

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**FDAM İLE HAREKET ETTİRİLEN DÖRT ÇEKER MOBİL
ROBOTUN FPGA İLE KONTROLÜ**

MEHMET BURAK GÖLEN

Yüksek Lisans Tezi

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekatronik Mühendisliği Bilim Dalı

OCAK 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**FDAM İLE HAREKET ETTİRİLEN DÖRT ÇEKER MOBİL
ROBOTUN FPGA İLE KONTROLÜ**

Tez Yazarı

MEHMET BURAK GÖLEN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi HAKAN ÇELİK

OCAK 2020

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: FDAM ile Hareket Ettirilen Dört Çeker Mobil Robotun FPGA ile Kontrolü

Yazarı: MEHMET BURAK GÖLEN

İlk Teslim Tarihi: 24.12.2019

Savunma Tarihi: 24.1.2020

TEZ ONAYI

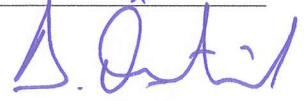
Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi HAKAN ÇELİK
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

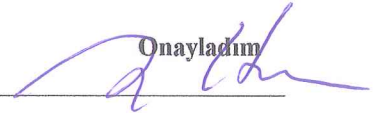

Onayladım

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi DURSUN ÖZTÜRK
Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Üye: Doç.Dr. AYŞEGÜL UÇAR
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “FDAM ile Hareket Ettirilen Dört Çeker Mobil Robotun FPGA ile Kontrolü” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24/1/2020

MEHMET BURAK GÖLEN



ÖNSÖZ

Bu çalışmada karşısına çıkan engelleri algılayarak yönünü belirleyen bir dört çeker mobil robotun tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dört çeker mobil robotun her bir tekerleği kapalı çevrimli FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru) ile hareket ettirilmiştir. Dört çeker mobil robotun kontrol algoritması National Instruments firması tarafından üretilen Myrio-1900 FPGA geliştirme kartında oluşturularak mobil robotun engelleri hızlı bir şekilde algılaması ve hızlı bir şekilde tepki vererek yönünü belirlemesi sağlanmıştır.

Tez çalışmam süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan Çelik'e ve Arş. Gör. Tevfik YİĞİT'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarım boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünün değerli öğretim elemanlarına ve çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **MF.19.14** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

MEHMET BURAK GÖLEN

ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
EKLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
SİMGELER	xii
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
2. SAHADA PROGRAMLANABİLİR KAPİ DİZİSİ (FPGA)	5
2.1. FPGA Mimarisi	6
2.2. FPGA Programlama Yöntemleri	9
2.3. FPGA Programlamada Tasarım Süreci	10
3. LABVIEW İLE FPGA PROGRAMLAMA	12
3.1. LabVIEW Blok Penceresi	13
3.2. LabVIEW Ön Panel.....	14
4. MOBİL ROBOTLAR.....	19
4.1. Elektronik Diferansiyel Sistemler.....	20
4.1.1. Ackermann-Jeantand Modeli	21
4.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru	24
4.2.1. FDAM Kapalı Çevrim Kontrolü	28
4.3. Servo Motor.....	30
5. MATERYAL VE METOT	31
5.1. Mobil Robot Kontrolünde Kullanılan FPGA'nın Özellikleri	36
5.2. Odrive Motor Sürücü Kartı.....	38
5.3. LiDAR Mesafe Sensörü.....	39
5.3.1. LiDAR Mesafe Ölçümü	43
5.4. Mobil Robot Kontrol Algoritması	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR.....	57
EKLER	60
ÖZGEÇMİŞ.....	A

ÖZET

FDAM ile Hareket Ettirilen Dört Çeker Mobil Robotun FPGA ile Kontrolü

MEHMET BURAK GÖLEN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020, Sayfa: xii + 0059

Son yıllarda gelişen mikroişlemci teknolojisi, sensör teknolojisi ve motor sürücü sistemlerindeki gelişmeler ile birlikte mobil robotlar hakkında yapılan çalışmalar artmıştır. Mobil robotlar genellikle insanlar açısından tehlikeli ortamlarda yapılan arama kurtarma çalışmalarında, yük taşıma-yerleştirme sistemlerinde, coğrafi bilgi sistemlerinde veya haritalamada kullanılmaktadır.

Bu çalışmada karşısına çıkan engelleri algılayarak yönünü belirleyen bir dört çeker mobil robotun tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dört çeker mobil robotun her bir tekerleği kapalı çevrimli FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru) ile hareket ettirilmiştir. Böylece daha hassas dönüş açısı ve geniş bir hız aralığında çalışma imkânı elde edilmiştir. Ayrıca mobil robot tekerleklerinin yüksek verimli tahrik elemanı olan FDAM ile hareket ettirilmesi ile mobil robotun enerji tüketimi de azaltılarak çalışma süresi arttırılmıştır. Dört çeker mobil robotun kontrol algoritması National Instruments firması tarafından üretilen Myrio-1900 FPGA geliştirme kartında oluşturularak mobil robotun engelleri hızlı bir şekilde algılaması ve hızlı bir şekilde tepki vererek yönünü belirlemesi sağlanmıştır.

Çalışmada engelleri daha doğru ve hassas bir şekilde algılamak için yüksek hassasiyete sahip LiDAR kullanılmıştır. LiDAR dört çekerli mobil robotta bulunan bir servo motor üzerine monte edilmiştir. Servo motor ile LiDAR'a hareket kabiliyeti kazandırılmaktadır. Servo motor sayesinde LiDAR iki yüz yetmiş derece görüş açısına sahip olmaktadır. Böylece mobil robot karşısına çıkan tüm engelleri algılayabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: FPGA, Dört Çeker Mobil Robot, LiDAR, FDAM, LabVIEW

ABSTRACT

Control with FPGA of the Four-Wheel Drive Mobile Robot Driven by BLDC Motor

MEHMET BURAK GÖLEN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering

January 2020, Pages: xii + 0059

In recent years, studies on mobile robots are increased thanks to improvement of microprocessor & sensor technology, motor driver systems. Mobile robots are frequently used in search and rescue operations occurring in places where is considered dangerous for human to work, in load carry and displacement operations, in geographic information systems or in mapping processes.

In this study, a 4WD robot that detect obstacles and decide its path according to them was designed and required control processes were applied. Each wheel of designed robot was propelled with closed loop BLDC (Brushless DC) motor. By doing this not only more precise turning angle was achieved, but also ability to work with very high-speed range was obtained. Besides, together with closed loop BLDC motor, which is considered as highly efficient propulsion device, total energy requirement of mobile robot decreased and thus led us to achieve more operation time between each recharge. Control algorithm of 4WD mobile robot was created by using Myrio-1900 FPGA development card (produce by National Instrument) and thus provide the robot to perceive and react quickly to decide its path

In this study, to detect obstacles quicker and more precisely, LiDAR was used which has high sensitivity rate. LiDAR was mounted on a servo motor located on the 4WD robot. LiDAR was given ability to move by using servo motor. With servo motor combination, LiDAR has a range of 270-degree field of view. Thence the mobile robot able to detect all the obstacle that it faced with.

Keywords: FPGA, 4WD Mobile Robot, LiDAR, FDAM, LabVIEW

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. FPGA Blok Diyagramı.....	5
Şekil 2.2. FPGA'yı Oluşturan Anahtar Blokları	6
Şekil 2.3. FPGA Bağlantı Blokları	6
Şekil 2.4. LUT Tabanlı Programlanabilir Mantık Öbeği.....	7
Şekil 2.5. İki Girişli bir LUT için Doğruluk Tablosu	8
Şekil 2.6. İki Girişli LUT	8
Şekil 2.7. Programlanmış FPGA'nın Bir Bölümü	9
Şekil 2.8. FPGA Programlamada Tasarım Süreci İçin Akış Diyagramı.....	11
Şekil 3.1. LabVIEW Ana Ekranı	12
Şekil 3.2. LabVIEW Boş Blok Şeması.....	13
Şekil 3.3. LabVIEW Boş Ön Panel	15
Şekil 3.4. LabVIEW Fonksiyon Paleti	15
Şekil 3.5. LabVIEW Kontrol Paleti.....	16
Şekil 3.6. LabVIEW Mesafe Ölçümü FPGA Paneli.....	17
Şekil 3.7. LabVIEW Mesafe Ölçümü Blok Şeması	17
Şekil 3.8. LabVIEW Mesafe Ölçümü Ön Panel	18
Şekil 4.1. Dört Çekerli Mobil Robota Uygulanan Elektronik Diferansiyel Sistemi.....	21
Şekil 4.2. Ackermann-Jeantand Modeli	21
Şekil 4.3. FDAM Stator ve Rotor	25
Şekil 4.4. Artımsal Enkoder Sinyalleri.....	26
Şekil 4.5. Mosfetler İle Yapılmış FDAM Sürücü Devresi	27
Şekil 4.6. Anahtarlama Sinyalleri ve Zıt EMK gerilimleri.....	27
Şekil 4.7. FDAM'ın Kapalı Çevrimli Kontrol Diyagram	29
Şekil 4.8. Servo Motorun Yapısı	30
Şekil 5.1. Mobil Robotun Yandan Görünüşü	31
Şekil 5.2. Mobil Robotun Önden Görünüşü	32
Şekil 5.3. Mobil Robotun Üstten Görünüşü	32
Şekil 5.4. Mobil Robotun Alttan Görünüşü.....	33
Şekil 5.5. Mobil Robotun Bağlantı Şeması	35
Şekil 5.6. Myrio-1900 FPGA Geliştirme Kartı	37
Şekil 5.7. Myrio-1900 İç Yapısı	37

Şekil 5.8. Odrive Motor Sürücü Kartı	39
Şekil 5.9. LiDAR Lite V-3 Mesafe Sensörü.....	40
Şekil 5.10. LiDAR I ² C Protokol Sinyalleri	42
Şekil 5.11. LiDAR PWM Sinyali	42
Şekil 5.12. LiDAR Mesafe Ölçümü Test Düzeneği	43
Şekil 5.13. LiDAR Mesafe Ölçümü için Osiloskop Ekranı.....	44
Şekil 5.14. LiDAR Mesafe Ölçümü LabVIEW Sonucu.....	44
Şekil 5.15. LiDAR Mesafe Sensörü İle Engel Ölçümü	45
Şekil 5.16. Mobil Robot Kontrol Akış Diyagramı	46
Şekil 5.17. LabVIEW Proje Ekranı	47
Şekil 5.18. LiDAR'ın Hareketleri	48
Şekil 5.19. Mobil Robot Kontrolü için Oluşturulan Programın LabVIEW Ön Paneldeki Ara Yüzü	49
Şekil 5.20. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması	49
Şekil 5.21. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engel için Yörüngesi	50
Şekil 5.22. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi	51
Şekil 5.23. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılayarak Sola Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi.....	51
Şekil 5.24. Mobil Robotun Ön Taraftaki ve Sol Taraftaki Engeli Algılayarak Sağa Doğru Yön Değiştirmesi	52
Şekil 5.25. Mobil Robotun Ön Taraftaki ve Sol Taraftaki Engeli Algılayarak Sağa Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi	53
Şekil 5.26. Mobil Robotun Ön Taraftaki, Sol Taraftaki ve Sağ Taraftaki Engeli Algılayarak Geri Yönde İlerlemesi ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi	54
Şekil 5.27. Mobil Robotun Ön Taraftaki, Sol Taraftaki ve Sağ Taraftaki Engeli Algılayarak Geri Yönde İlerlemesi ve Sola Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi.....	54

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Ackermann- Jeantand Modeli Parametreleri.....	22
Tablo 4.2. Anahtar Konumları Tablosu	28
Tablo 5.1. iBM2217Q FDAM Teknik Özellikleri	34
Tablo 5.2. Myrio-1900 FPGA Geliştirme Kartının Özellikleri	36
Tablo 5.3. LiDAR Lite V-3 Teknik Özellikleri	41



EKLER LİSTESİ

Sayfa

Ek- 1: HEDS-5540-A01 ENKODER'IN TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	60
---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

G	: Yatay Olarak İki Teker Arası Uzaklık
R	: Arkada Bulunan Aksın Merkezinin Direksiyon Yarıçapı
R _i	: Arkadaki Tekerlerin İç Yarıçapı
R _d	: Arkadaki Tekerlerin Dış Yarıçapı
r	: Önde Bulunan Aksın Merkezinin Direksiyon Yarıçapı
r _i	: Öndeki Tekerlerin İç Yarıçapı
r _d	: Öndeki Tekerlerin Dış Yarıçapı
V _i	: İç Tarafta Bulunan Arka Tekerleğin Hızı
V _d	: Dış Tarafta Bulunan Arka Tekerleğin Hızı
v _i	: İç Tarafta Bulunan Ön Tekerleğin Hızı
v _d	: Dış Tarafta Bulunan Ön Tekerleğin Hızı
V _{ref}	: Mobil Aracın Referans Hız Değeri
U	: Dikey Olarak İki Teker Arasındaki Uzaklık
β	: Direksiyon Açısı

KISALTMALAR

FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
LiDAR	: Light Detection Ranging

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen mikroişlemci ve algılayıcı teknolojisi, robotlar ve otonom sistemler üzerine yapılan çalışmaların hızlanmasında olumlu bir etkiye sahiptir. Bu etki sayesinde robotlar da üretim, sağlık, hizmet, uzay ve savunma alanlarında daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Sensör teknolojisindeki gelişim hızı mobil robot yapımında kullanılan sensörlerin sayılarının artmasına ve fiyatlarının düşmesine neden olmuştur [2]. Tekrar tekrar programlayıp kullanabileceğimiz mikroişlemci tabanlı kartların geliştirilmesi birçok alanda yeni çalışmaların kapısını açmıştır. Son yıllarda paralel işlem yapma yeteneğine sahip olan FPGA robotik, otomotiv, sağlık, endüstriyel otomasyon, akıllı araç teknolojileri vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Mobil robot alanındaki çalışmaların çoğu haritalama ve keşif üzerinedir [4]. Mobil robotlar insanlar için tehlikeli çalışma ortamlarında rahatlıkla çalışabilirler [5]. Mobil Robotlar tehlikeli ortamların yanı sıra gelişmiş ülkelerde nüfusun yaşlı olması nedeniyle insanlara günlük hayatlarında yardımcı olmaları içinde kullanılmaktadırlar [6]. Tek bir FPGA aygıtı, tek bir kartta özel donanım ile birlikte bir veya daha fazla işlemciye sahip olacak şekilde yapılandırılabilir. Doğal olarak yeniden yapılandırılabilirlik özellikleri ve paralel işlem yapabilme yeteneği nedeniyle kolay ve hızlı donanıma olanak tanır [7].

Bu çalışmada mobil robotlarla ilgili yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak dört çeker mobil robotun her bir tekerleği kapalı çevrimli FDAM ile hareket ettirilmiştir. Böylece daha hassas dönüş açısı ve geniş bir hız aralığında çalışma imkânı elde edilmiştir. Dört çeker mobil robotun kontrol algoritması FPGA’da oluşturularak mobil robotun engelleri hızlı bir şekilde algılaması ve hızlı bir şekilde tepki vererek yönünü belirlemesi sağlanmıştır. Çalışmada engelleri daha doğru ve hassas bir şekilde algılamak için yüksek hassasiyete sahip LiDAR kullanılmıştır.

Tezin birinci bölümünde mobil robotlar hakkında kısa bir bilgi verilerek, literatürde bulunan benzer çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde ise FPGA hakkında genel bilgiler verilmiştir. FPGA mimarisinden ortaya çıkışından ve tasarım süreçlerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde mobil robot kontrolünde kullanılan FPGA geliştirme kartı National Instruments Myrio-1900 için genel bilgiler verilmiş ve bu kartın programlanmasında kullanılan görsel programlama dili LabVIEW hakkında bilgiler verilmiştir. Bu dilin görsel olarak avantajları, içyapısı ve ara yüzü hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise mobil robotlar hakkında genel bilgiler verilmiş ve mobil robotlarda kullanılan tahrik elemanlarına değinilmiştir. İlk olarak FDAM anlatılmış ardından servo motor hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca dört çeker mobil robotlarda kullanılan elektronik diferansiyel sistemlerinden bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde mobil robotun tasarımı ve FPGA ile kontrolü hakkında bilgiler verilmiştir. Mobil robotun FPGA ile kontrolü için kullanılan Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı hakkında

genel bilgiler verilmiş ve bu kartta oluşturulan mobil robot kontrol algoritmasına yer verilmiştir. Deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilerek elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Altıncı ve son bölümde ise bu tez çalışmasına dair sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Akçakoca, gezgin robotlar üzerine yaptığı çalışmada robot platformu (Eva robot) geliştirmiştir. Bu çalışmada, gezgin robot çalışmalarında kolaylık sağlamak ve hızlı uygulamalara imkân vermek için eğitim ve araştırma amaçlı mekanik, elektronik donanımlar ve kontrol yazılım mimarisi modüler ve tekrardan konfigüre edilebilir şekilde tasarlamıştır [1].

Han ve Xing mobil robotun üzerinde bulunan iki adet kamerayı ve sensörleri kullanarak karşısına çıkan engelleri algılayan ve nesne takibi yapan bir mobil robot geliştirmişlerdir. FPGA ‘nın kullanıldığı bu çalışmada ilk kamera mavi nesnenin takibini yaparken diğer kamera ortam taraması yaparak gerçek zamanlı olarak görüntüyü kullanıcıya aktarmaktadır. Sensörler tarafından engel algılandığında, kullanıcı mobil aracın üzerindeki kol sayesinde engeli ortadan kaldırılabilmektedir [2].

Csaba vd. bir mobil robotun navigasyon yönteminin geliştirilmesi için çoklu mesafe ölçüm sensörü ile ilgili çalışmışlardır. Üzerinde bir adet SICK l ms 151 tipi LiDAR sensörü, iki kızılötesi ve iki adet ultrasonik sensör yerleştirilen mobil araç bu sensörlerden gelen veriler sayesinde karşısına çıkan engellerden hızlıca kaçabilmekte ve aynı zamanda bulunduğu ortamı haritalayabilmektedir [4].

Chiu ve Lee FPGA kartı kullanılarak programlanan ve engellerden kaçan tekerlekli bir mobil robot tasarlanıp üretilmiştir. Bu tekerlekli robotta kontrol tekniği olarak Bulanık Mantık kullanılmıştır. Bulanık Mantık sayesinde tekerlekli robot en kısa yolu belirleyerek engellerden kaçmaktadır [5].

Sırmaçek, FPGA ile bir mobil robot için öğrenme modellemesi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirdiği modellemede amaç mobil robotun bulunduğu çevreyi ve karşısına çıkan engellerden kaçmayı öğrenmesidir. Bunun için bir YSA modeli oluşturulmuş ve mobil robota uygulanmıştır. Delphi ortamında oluşturduğu bir odada bilgisayar ortamında sanal olarak test sonuçları elde etmiştir. Elde ettiği sonuçları MATLAB ortamında karşılaştırmış ve yüzde seksen sekizlik bir öğrenme başarısı elde etmiştir [7].

Azarudeen ve Dolly elektronik olarak çalıştırılan FDAM’ın trapez hız kontrolü için geleneksel ve dijital darbe genişlik modülasyonu (PWM) kontrol şemasının performanslarının karşılaştırılmasını yapmışlardır. İki yöntem de PWM hız kontrol stratejisini izler ancak fark kontrolör kısmındadır. Bir sürücü sistemi geleneksel PI denetleyiciden oluşur ve diğeri dijital denetleyiciye sahiptir [8].

Premkumar vd. bir Quadcopter insansız hava aracını (İHA) dengelemek için FPGA prototip kartı üzerinde dijital bir uçuş kontrol cihazı tasarlamayı ve uygulamayı amaçlanmıştır. Projede FPGA kartına entegre olarak DSP kullanılmıştır [9].

Kho vd. tasarlanan mobil robotun belirlenen hedefe ulaşması istenmektedir. Mobil robot belirlenen hedefe ulaşırken GPS sensörü kullanmaktadır. Mobil robot üzerindeki GPS sensörü sayesinde karşısına çıkan engellerden kaçıp hedefe ulaşmaktadır [10].

Anitha ve Srinivasa FPGA kartı ile kontrol edilen mobil robot tasarlanmıştır. Tasarlan mobil robot karşısına çıkan engellere göre mesafe ölçümü yapmakta ve hızını ayarlayabilmektedir [11].

Muñoz vd. bir mobil robot tasarlanmış ve tasarlanan mobil robot FPGA kartı ile kontrol edilmiştir. Mobil robota göstererek öğrenme tekniği kullanılarak karşısına çıkan engellerden nasıl kaçması gerektiği öğretilmiştir. Öğrenmesi sağlanan mobil robotun karar verirken en kısa ve doğru yolu bulması içinde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır [12].

Yadav vd. PI kontrollü Buck-Boost konverter ile elektrikli araçlarda kullanılan FDAM'ın hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemde FDAM için gereken güç bir bataryadan sağlanmaktadır. Önerilen kontrol sisteminde DC link gerilimi Xilinx System Generator (XSG) tabanlı bir PI kontrolör ile ayarlanarak FDAM'ın hız kontrolü yüksek doğrulukta gerçekleştirilmiştir [13].

Kürkçü vd. FDAM'lar için, sistem tanımlama ve optimal pozisyon kontrol (LQR) metodu ile yapılan bir kontrolör tasarımı yaklaşımı sunulmaktadır. Bir geri beslemeli kontrolör, ileri beslemeli bir sürtünme giderme kontrolörü ile genişletilmiştir. LQR tasarımı kontrol eforunu azaltıcı ve optimal geri besleme kazançlarına sahip bir kontrolör olarak karşımıza çıkmıştır [14].

Tashakori vd. dijital darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanarak FDAM'lar için FPGA tabanlı bir kontrol sürücüsü gerçekleştirmişlerdir. Bu sürücüde FDAM komütasyonu için dâhili Hall Efekt sensörü kullanılmıştır. Önerilen yöntem MATLAB/Simulink ve Xilinx Integrated Software Environment (ISE) ortamında modellenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [15].

Artuğ, LabVIEW tasarım programı kullanılarak mikrodenetleyicili bir endüstriyel otomatik sıcaklık kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistem bir santigrat derece hassasiyetinde olup LabVIEW ön panelinden anlık olarak izlenebilmektedir. Bu sayede LabVIEW ön panelinden anlık olarak müdahale etmek mümkündür [16].

Orman ve Derdiyok dört tahrik motorlu bir mobil robotun gövde hızı ve yönelme açısının kontrolünü Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü (KDKKK) kullanarak benzetim ortamında test etmişlerdir. Mobil robotun hızı ve yönelme açısı her bir motorun ayrı ayrı açısal hızları hesaplanarak elde edilmiştir. Tasarlanacak olan KDKKK ile her bir motorun yörüngesinin ve konumunun kontrolü için ayrı ayrı tork işareti üretmişlerdir. KDKKK performansını anlamak için aynı referansları kullanan bir PI kontrolörde uygulamış ve sonuçları kıyaslamışlardır. Sonucunda KDKKK çok daha iyi sonuçlar göstermiştir [17].

Kumar vd. FDAM ların kapalı çevrim hız kontrolü LabVIEW ve bir mikro denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı FDAM'ın hızını değişen şartlar altında kontrol altında tutmaktır. FDAM'lara kontrol için PWM sinyalleri verilmiştir. Bu PWM sinyalleri sistemden gelen geri bildirim sinyalleri ile voltaj değerini değiştirmiştir. Böylece sistemin kapalı çevrim hız kontrolü yapması sağlanmıştır [18].

Chen vd. elektrikli bir traktör için FDAM'ları FPGA kartı ile kontrol etmişlerdir. ARM ve FPGA'nın entegre olduğu Myrio FPGA kartı kullanmışlardır. Kontrol strateji olarak PWM ile birlikte PID kapalı çevrim kontrolü yapmışlardır. Sonuçların doğruluğunu test etmek içinde kapalı alan deneyi yapmışlardır [19].

Yıldırım, araçlarda aktarım kısımlarının ortadan kaldırılması için motorları tekerleklerin içine yerleştirerek bir elektronik diferansiyel sisteminin tasarımını yapmıştır. Genelde arka tekerleklerle yapılan bu sistem bu çalışmada ön tekerlere uygulanmıştır. Böylece mekanikten oluşan kayıplar ve dişlilerin bakım ve onarım masrafları ortadan kaldırılmıştır [20].

Dan vd. dört çeker bir mobil robotun benzetim ortamında tasarımı gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakılarak dört çeker araçların diğer araçlara göre daha iyi dinamik performansa sahip oldukları ortaya çıkmıştır [21].

Yıldız, FDAM'ın karakteristiğine, yapısına ve çalışma şekline değinmiştir. FDAM'ın üç faz dinamik modellemesini yapmıştır ve motor kontrolünde genellikle kullanılan PI kontrol yöntemini kullanmıştır. Ek olarak FDAM'ların hız kontrolünün benzetimini yapmıştır. Simülasyon için MATLAB programından faydalanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre de FDAM'ların yüksek performans gerektiren uygulamalarda başarılı olduğu ortaya çıkmıştır [22].

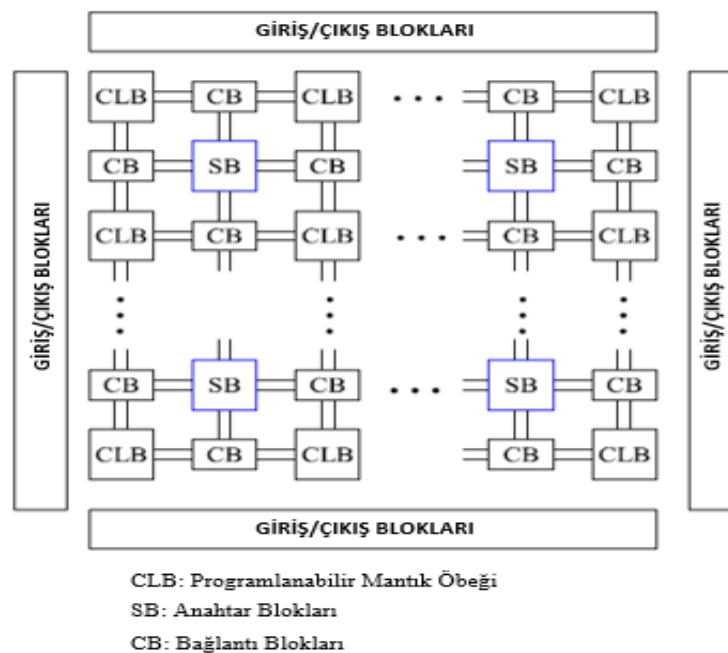
Wu vd. dört çekerli araçlar için bir elektronik diferansiyel sistemi tasarlamıştır. Bu tasarım sonucunda bir direksiyon kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Geleneksek tek tekerdeki torku referans alarak yapılan çalışmalardan farklı olarak dört tekerdeki hız değerleri referans alınmıştır. Ackermann yöntemi dört çeker sistemi için tekrardan düzenlenerek motorların kinematik denklemleri çıkarılmıştır. Elektronik diferansiyel sisteme uygulanmıştır. Bu yöntem ile daha az lastik aşınması elde edilmiştir ve aracı sabit hızda sürebilme özelliği geliştirilmiştir. İlk olarak benzetim ortamında ardından deneysel olarak da sonuçlar alınmıştır [23].

Genel olarak literatür çalışmaları incelendiğinde, mobil robotun yönelim algoritmalarına, mobil robotu tahrik eden elektrik motorunun kontrolüne ve mobil robotun elektronik diferansiyel yapısına ilişkin farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında literatür çalışmalarından farklı olarak dört çeker mobil robotun tekerlekleri FDAM ile hareket ettirilmiş ve mobil robotun FPGA ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan FDAM'lar kapalı çevrim olarak kontrol edilmiş ve engel algılaması için LiDAR mesafe sensörü kullanılmıştır. Ayrıca mobil robotun dönüşleri elektronik diferansiyel yapısı ile gerçekleştirilmiştir. Böylece hassas dönüş açısına sahip geniş bir hız aralığında çalışan verimli bir dört çeker mobil robot elde edilmeye çalışılmıştır.

2. SAHADA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZİSİ (FPGA)

FPGA (Field Programmable Gate Array), “Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi” olarak tanımlanmaktadır. Lojik kapılar bütünü olarak oluşturulurlar ve programcının istediği fonksiyonları yerine getirmek için kullanılırlar. 1985 yılında Xilinx firması tarafından CPLD (Karmaşık Programlanabilir Lojik Aygıt)’lerin eksiklerinden kurtulup avantajlarını kullanmak amacıyla piyasaya sürülmüştür. FPGA’lerin yapısı lojik bloklar ve ara bağlantıları içerir. Programcıya sunduğu esnek programlama, maliyetin düşük olması ve hızlı örnekleme yapabilmesi ile sayısal tasarımda son kullanıcı için vazgeçilmez bir ürün haline gelmiştir [7]. Paralel işlem yapma yeteneğine sahip olan FPGA günümüzde robotik, otomotiv, sağlık, endüstriyel otomasyon, akıllı araç teknolojileri, görüntü işleme, İnsansız Hava ve Kara araçları vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

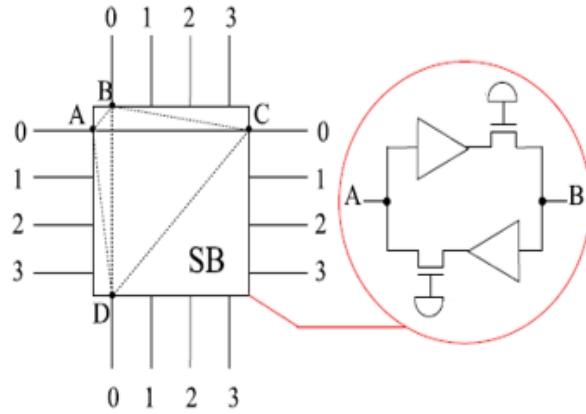
FPGA'lar sayesinde kısmen de olsa büyük lojik devreleri gerçekleyebilmek mümkündür. Programlama yapılırken lojik elemanların her biri programda istenilen fonksiyonu gerçekleştirebilmek için bağlantılar oluşturarak programlanabilir. Şekil 2.1'de bir FPGA'nın genel görünümü verilmiştir. Lojik bloklar tasarım olarak iki boyutlu diziler şeklinde yerleştirilirler. Dizilen bu lojik bloklar arasında bulunan bağlantı hatları taşıyıcı kanal olarak çalışmaktadır. Bu taşıyıcı kanallar lojik blokların ve bağlantıların istenilen fonksiyonu gerçekleştirmek için birbirlerine bağlanmalarını sağlayan programlanabilen anahtarlardan oluşurlar. Farklı sayılarda bağlantı hatları ve programlanabilir anahtarlar içeren FPGA'lar bulunmaktadır [24].



Şekil 2.1. FPGA Blok Diyagramı

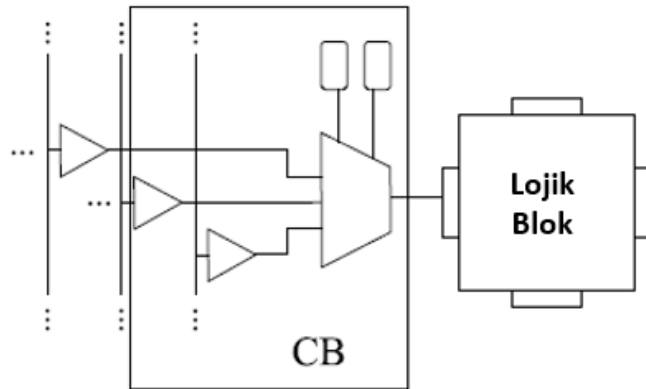
2.1. FPGA Mimarisi

FPGA'lar son kullanıcı için kolaylık sağlamak amacıyla tasarlanmışlardır. Herhangi bir üretim basamağı kullanmadan kullanıcının yapması gereken sadece istediği sayısal işlevi yerine getirecek programı yazmaktır. FPGA genel olarak üç ana kısımdan oluşur. Bunlar bağlantı blokları, anahtar blokları ve lojik bloklardır. Bu üç kısım temel kısımlardır. Bunlara ek olarak bellek bloğu ve aritmetik işlem bloğu gibi özel blokları bulunan FPGA kartları da bulunmaktadır. FPGA'yı oluşturan anahtar bloklarının genel yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. FPGA'yı Oluşturan Anahtar Blokları

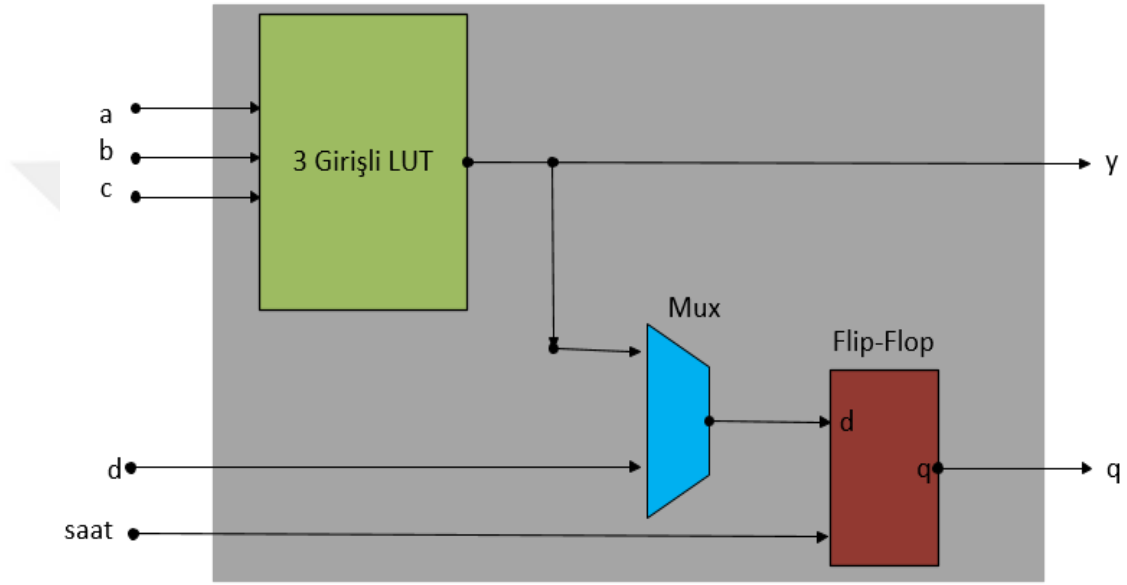
FPGA'da bulunan bağlantı bloklarının genel yapısı Şekil 2.3'de verildiği gibidir. Bu bağlantı bloklarında bulunan bağlantı noktalarının durumu transistörün durumuna göre ayarlanır. Eğer transistör açık ise bağlantı var kapalı ise bağlantı yoktur.



Şekil 2.3. FPGA Bağlantı Blokları

Look up Table (LUT) tabanlı Programlanabilir Mantık Öbeği (CLB) saklama elemanlarından oluşurlar. Bunlar genellikle birden fazla girişli çoklayıcılardan veya iki girişi

bulunan bir lojik kapıdan oluşurlar. Bu bloklar karmaşık fonksiyonların gerçekleştirilmesinde önemli bir rol alırlar. Bunların yanı sıra bu bağlantı sırasında bağlantı hatlarının ve anahtarların sayısı da oldukça fazladır. LUT tabanlı CLB'ler yapı olarak çok fazla çeşitlilik gösterebilir. Şekil 2.4'de LUT tabanlı CLB'nin genel yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda görüldüğü gibi LUT tabanlı CLB'de genel olarak üç girişli LUT'lar, MUX ve Flip-Flop devreleri bulunmaktadır. Karmaşık fonksiyonlar bu lojik blokların birbirlerine bağlanmalarıyla oluşturulabilir. Lojik blokların giriş ve çıkışları da FPGA kartının harici birimleri ile bağlantı kurmasını sağlamaktadır [25].



Şekil 2.4. LUT Tabanlı Programlanabilir Mantık Öbeği

Bağlantı blokları ise giriş çıkış blokları ile lojik bloklar arasında bağlantıyı kuran yapılardır. Bağlantı blokları genel olarak program ile kontrol edilebilen anahtarlardan ve yönlendirme kanallarından oluşurlar. Program ile kontrol edilebilen anahtarlar EPROM ve EEPROM teknolojileri kullanılarak statik RAM hücresi ile kontrol edilebilen geçiş transistörü ve antifuseden oluşturulur. Yönlendirme kanalları konumları birbirinden farklı olan lojik blokların en etkin şekilde bağlanması için farklı uzunlukta tasarlanırlar. FPGA'da ne kadar lojik fonksiyon kullanılacağı veya işlem kapasitesi bu yönlendirme kanallarının sayısı ile doğru orantılıdır. Eğer bir FPGA kartında yönlendirme kanalları az ise lojik blok sayısı ne kadar çok olursa olsun bağlantı olmadığı için lojik fonksiyonları gerçekleştirilmesi de azalacaktır [26].

FPGA'da bulunan lojik bloklar genel olarak az sayıda girişe ve bir adet çıkışa sahiptirler. Ancak piyasada özel olarak üretilen farklı sayıda lojik bloklara sahip FPGA'lar da bulunmaktadır. FPGA için genel olarak en yaygın kullanılan lojik blok LUT'tur. LUT'lar küçük lojik fonksiyonları gerçekleştirebilmek için depolama hücreleri içerirler. Bu depolama hücreleri sadece 0 ya da 1 olarak bir lojik ifadeyi tutarlar. Depolama hücresine tutulan değerin çıkışın elde edilmesinde

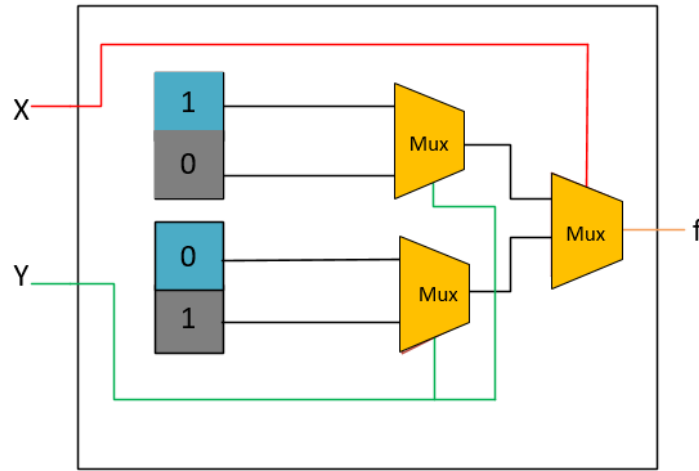
kullanılır. Örneğin iki adet değişkeni bulunan bir doğruluk tablosu dört adet satıra sahiptir. Bu satırlar LUT'un depolama hücrelerini ifade etmektedir. Bu depolama hücrelerinden her biri doğruluk tablosundaki satırlardan birinin çıkış değerini içermektedir. Şekil 2.5'deki doğruluk tablosunda görülen x ve y değerleri giriş değerleridir. Bu girişler çoklayıcının seçici girişi olarak kullanılmaktadır. LUT'un çıkışı bu x ve y değerlerine bağlıdır.

X	Y	f
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$$f = x\bar{y} + xy$$

Şekil 2.5. İki Girişli bir LUT için Doğruluk Tablosu

Şekil.2.5'deki tabloda görünen f fonksiyonu LUT'daki çoğullayıcıların ayarlanması ile oluşturulur. $x=y=0$ iken f fonksiyonun sonucu 1'dir. Yani LUT çıkışı depolama hücresi tarafından sürülür. Şekil 2.6'da f fonksiyonunun iki girişli bir LUT ile gerçekleştirilmesi gösterilmiştir.

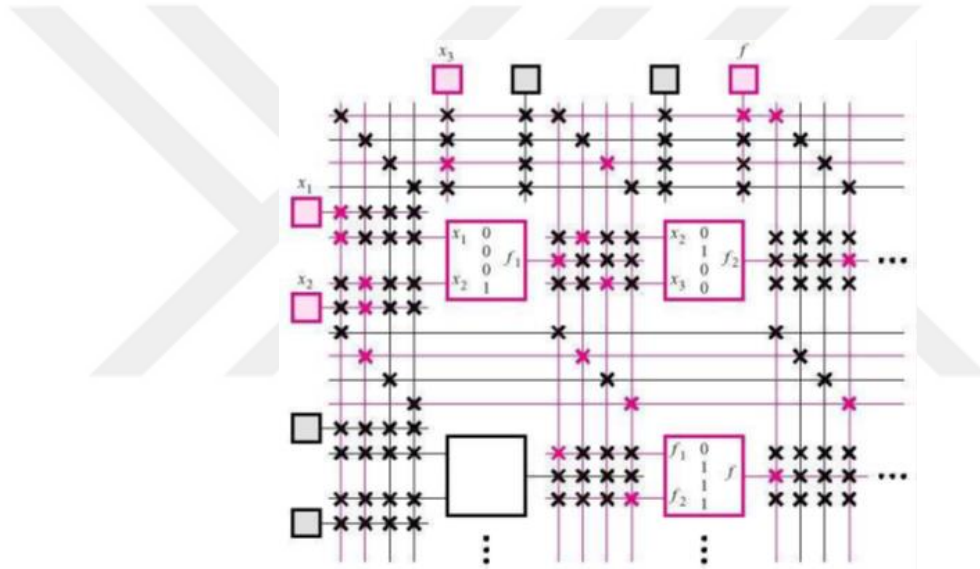


Şekil 2.6. İki Girişli LUT

FPGA kartında yüzlerce hatta binlerce lojik devre bulunmaktadır. Bu kadar lojik devrenin sığabilmesi için küçük olmaları gerekmektedir. Bunun içinde CAD yazılımları kullanılarak tasarım yapılmaktadır. CAD programında tasarımı yapılan FPGA üretilerek piyasaya sürülmektedir.

LUT'da bulunan depolama hücreleri geçicidirler. Yani enerji kesildiğinde depolanan değer kaybolmaktadır. Bu da çalışma süreci boyunca enerjiye bağlı olmalarını gerektirmektedir. Bu sorunu çözmek için FPGA kartlarına verileri devamlı olarak tutan hafıza çipleri yerleştirilmiştir. Bu hafıza çiplerine Programmable Read Only Memory (PROM) ismi verilmiştir. Güç kaynağı açıkken PROM kısmına kaydedilen veriler güç kesildiğinde bile verileri saklamaktadır. Enerji kesilse bile tekrar enerji verildiğinde program en son kaydedilen çıkış değerlerinden devam etmektedir [27].

Şekil 2.7'de herhangi bir devreyi gerçekleştiren FPGA'nın küçük bir bölümü gösterilmiştir. Burada kırmızı ile işaretlenen anahtarlar kapalı siyah ile gösterilen anahtarlar ise açık konumdadırlar. Böylece giriş değerleri kullanılarak bağlantı ve anahtar blokları uygun yönlendirme kanalları ile yönlendirilerek istenilen lojik çıkışlar elde edilmektedir.



Şekil 2.7. Programlanmış FPGA'nın Bir Bölümü [7]

2.2. FPGA Programlama Yöntemleri

FPGA, içerisinde bulunan programlanabilen anahtarlar ve lojik bloklardan dolayı programlanabilme özelliğine sahiptir. FPGA'da bulunan bu anahtarların programlanma teknolojisi FPGA'nın programlanma teknolojisini de belirlemektedir. Kullanılan bu anahtarların matrisleri üretimlerinden bağımsız olarak açık konumda veya kapalı konumda olabilirler. FPGA için kullanılan bu anahtarlardan beklenen özellikler aşağıda sıralandığı gibidir.

- Yarı iletken üzerinde mümkün olan en küçük alanı kaplamaları
- Devre iletim durumundayken küçük bir direnç göstermeleri
- Devre kesim durumunda ise büyük bir direnç göstermeleri

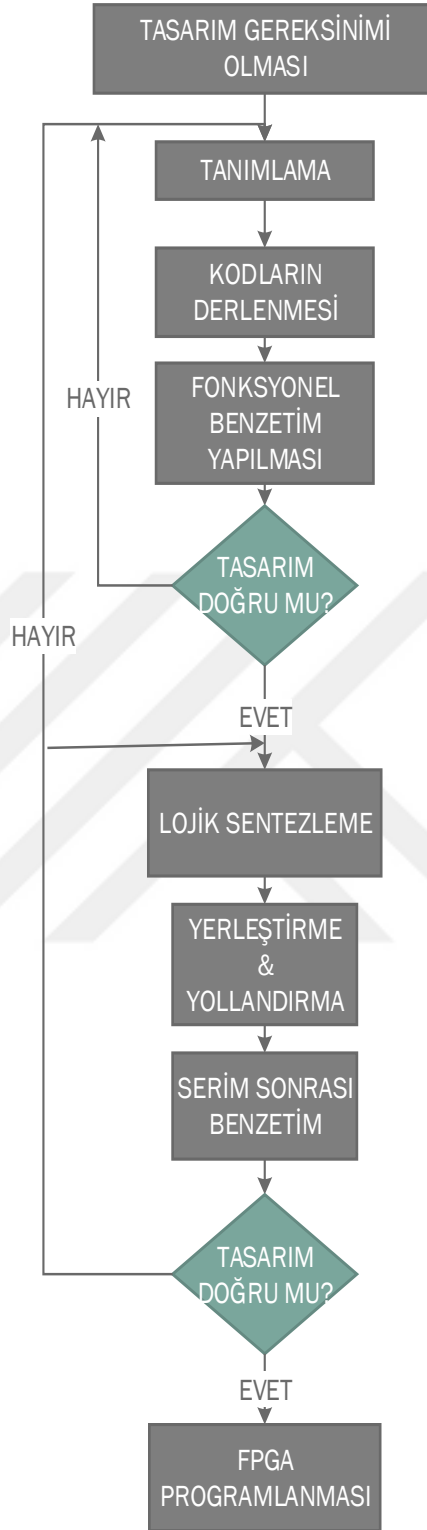
- Sayısı ne kadar çok olursa olsun bütünleşik olarak verimli bir çalışma gerçekleştirmeleri beklenmektedir.

2.3. FPGA Programlamada Tasarım Süreci

Herhangi bir programın tasarım süreci ilk olarak gerçekleştirilecek devrenin sözel, şematik veya görsel olarak ifade edilmesiyle başlar. Görsel tanımlamada piyasada birçok firma tarafından geliştirilmiş programlar bulunmaktadır.

Görsel tasarım sözel tasarıma göre kullanıcıya kolaylık sağlamak için oluşturulmuş bir tanımlama dilidir. Kullanıcının tasarım için gerekli blokları birbirine bağlaması yeterlidir. Sözel tasarımda ise genel olarak yüksek seviyeli diller olarak adlandırılan HDL (Hardware Description Language) kullanılır. Bu diller de kendi arasında birden fazla çeşide ayrılmaktadır. Sonuç olarak tanımlama ne şekilde olursa olsun tasarlanan program derleme işleminden sonra standart bağlantı listesine (netlist) dönüştürülür. Programı test etmek için benzetim yapılabilir. Böylece gerçek ortamda denemeden önce program benzetim ortamında denenebilir. Eğer problem varsa bu kısımda denendikten sonra gerekli düzenlemeler yapılabilir.

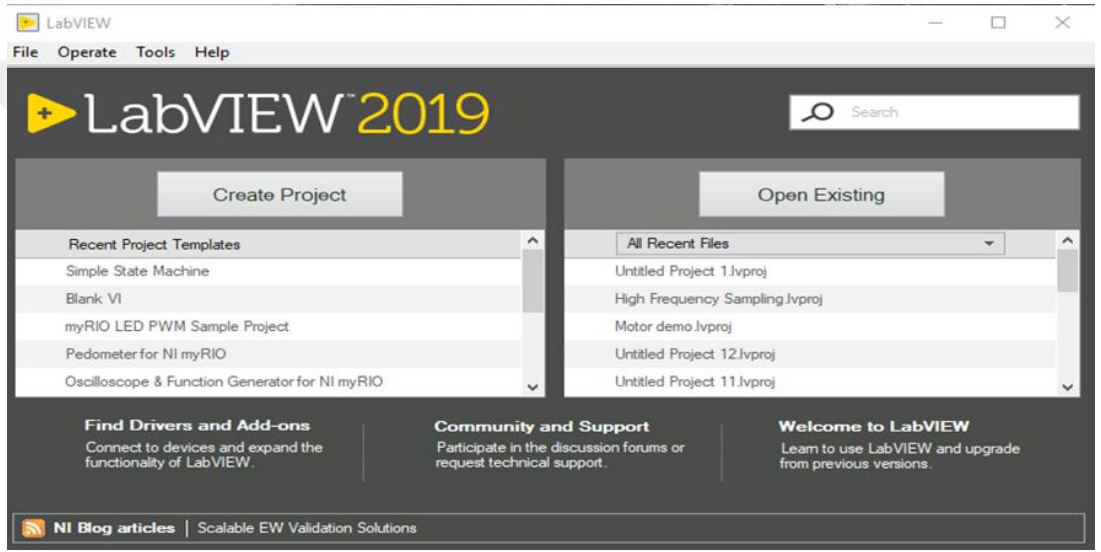
Tasarım süreci Şekil 2.8’de verilen akış şemasında görüldüğü gibi ilk olarak tasarım ihtiyacı ardından tanımlama, derleme, fonksiyonel benzetim, lojik sentezleme, yerleştirme, serim sonrası benzetim ve son olarak da FPGA’nın programlanmasından oluşmaktadır [7]. Bu sayede en doğru şekilde tasarım yapılmaya çalışılır.



Şekil 2.8. FPGA Programlamada Tasarım Süreci İçin Akış Diyagramı

3. LABVIEW İLE FPGA PROGRAMLAMA

National Instruments firması tarafından üretilen LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) görsel bir yazılım olarak tasarlanmıştır. LabVIEW genel olarak mühendislerin ve bilim insanlarının alışkın olduğu terminolojiyi ve ikonları kullanır. Bu nedenle 1986'dan beri genel olarak mühendisler ve bilim insanları tarafından kullanılmaktadır. LabVIEW programı tasarımı karmaşıklıktan uzak ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu sayede elektronik hakkında bilgisi olan ancak herhangi bir programlama dili hakkında tecrübesi olmayanlar LabVIEW'de bulunan grafikler sayesinde istediği yazılımı geliştirebilirler [16].



Şekil 3.1. LabVIEW Ana Ekranı

LabVIEW yazılımının kurulumu ile birlikte projelerde kullanılabilecek hazır örnekler de gelmektedir. Sinyal üretimi, PWM üretimi, sinyal işleme, matematiksel işlemler, lojik işlemler gibi birçok hazır kütüphane bulunmaktadır. Ayrıca LabVIEW'de programın çalışması animasyon halinde izlenebilmektedir. Bu özelliği sayesinde programlamada bir hata varsa hatanın olduğu yer kolayca bulunabilmektedir.

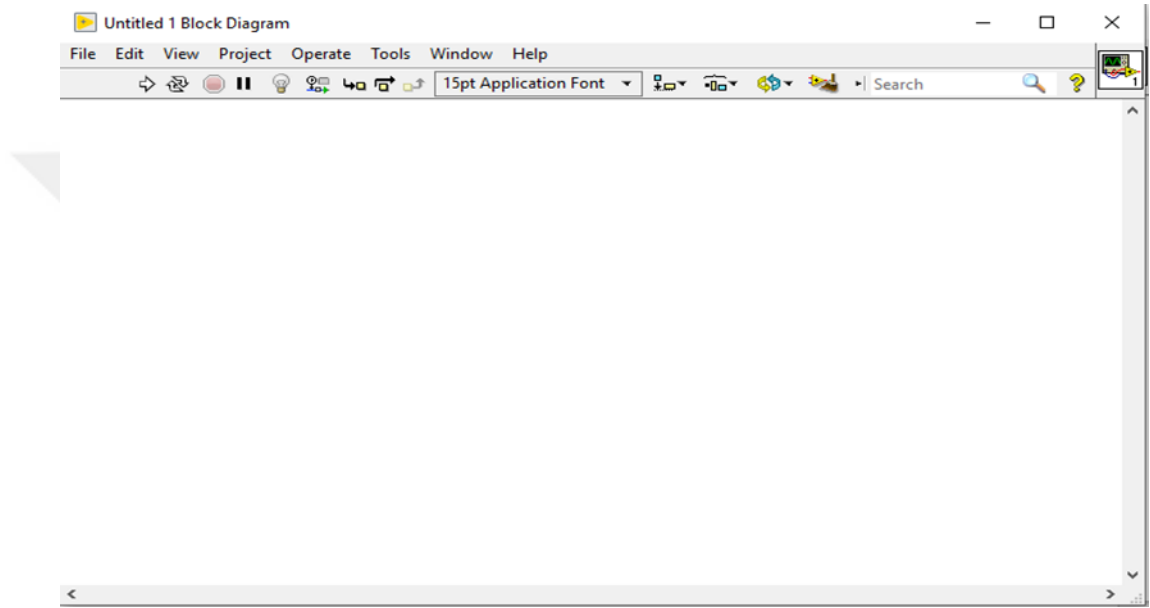
LabVIEW ile görsel programlamada her olay bir şemayla veya nesneyle ifade edilir ve bu nesneler geliştirdiğiniz algoritmaya göre birbirlerine hatlarla bağlanırlar. LabVIEW programının çalışma kısımları sanal araçlar (VI) olarak adlandırılır. Sanal araçlar olarak adlandırılmalarının nedeni gerçekte kullandığımız birçok ölçüm aletini taklit etmesidir. Bu ölçüm aletlerinin PC ortamında kullanılabiliyor olması başta ekonomik olmak üzere birçok konuda avantaj sağlamaktadır.

LabVIEW'de bulunan her VI üç kısımdan oluşur. Bu kısımlardan biri tasarımın yapıldığı ve görsel olarak kodlamanın gerçekleştiği blok şeması ya da arka panel olarak adlandırılır. İkinci kısım

ise tasarlanan sisteme veri girişinin yapıldığı veya çıkış verilerinin okunduğu ön paneldir. Son kısım ise simge ve bağlantı penceresidir.

3.1. LabVIEW Blok Penceresi

LabVIEW blok şeması programlamanın yapıldığı ana kısımdır. Bu kısımda G kod (grafiksel kod) diye adlandırılan görsel programlamayla kodlama yapılır. Boş bir blok şeması Şekil 3.2 de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. LabVIEW Boş Blok Şeması

Blok şemasında üst tarafta bulunan araç çubuklarının fonksiyonları sırasıyla aşağıda gösterildiği gibidir.

-  VI'yı başlatmak için kullanılır. İçi dolu beyaz ok görünümündedir.
-  VI'nı sorunsuz başladığını ve çalıştığını gösterir.
-  VI'da hata olduğunu o yüzden çalıştırılamayacağını gösterir.
-  VI'ı sürekli çalıştırmak için kullanılan kısımdır.
-  VI'nın sürekli çalıştırıldığını göstermektedir.
-  VI'yı tamamen durdurmak için kullanılır. Bu tuşa basıldıktan sonra tekrar başlatmak gerekir programı devam ettirmek mümkün değildir.
-  VI'yı durdurmak için kullanılır. Bu tuşa basıldığında program durdurulur ve blok şemasında programın durduğu yer vurgulanır.
-  VI'yı izlemek için kullanılır. Bu tuşa basıldığında VI işlemleri yaparken işlem adımları gözlemlenebilir.



VI çalışırken ekleme yapabilmeyi sağlar.



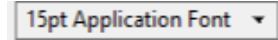
VI çalışırken müdahale edebilmeyi sağlar. Bu tuşa basıldığında düğüm açılır ve program durur. Üzerine tıklanan altprogram ya da programdaki kısım müdahale edilerek düzeltilir bir defa çalıştırılır ve program durur.



VI çalışırken müdahale edebilmeyi sağlar. Bu tuşa basıldığında üzerine tıklanan altprogram ya da programdaki kısım çalıştırılmaz ve üzerinden atlanarak bir sonraki düğümden program çalıştırılmaya devam eder.



VI çalışırken müdahale edebilmeyi sağlar. Bu tuşa basıldığında üzerine tıklanan altprogram ya da programdaki kısım çalışır ardından programdan çıkmayı sağlar.



VI üzerinde bulunan yazıların font değerlerini ayarlayarak görsel olarak düzen katmayı sağlar.



VI üzerinde bulunan nesneleri yatay ve dikey olarak hizalamayı sağlar.



VI üzerinde bulunan nesnelerin yatay ve dikey olarak aralarındaki mesafeyi ayarlamayı sağlar.



VI üzerinde bulunan nesneleri grup haline getirmeyi grup halindeki nesneleri de dağıtmayı sağlar.



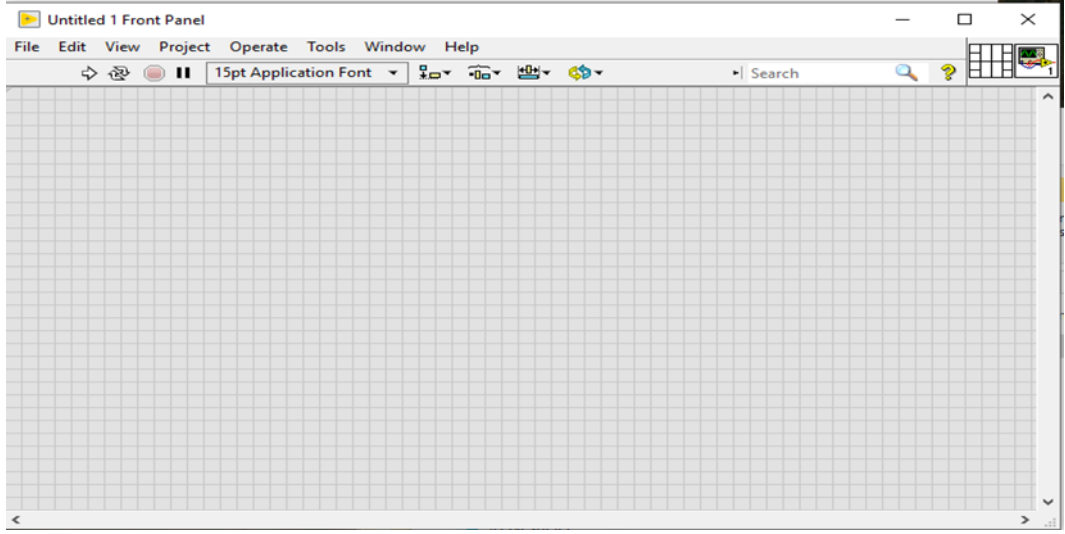
VI üzerinde bulunan kod görüntüsünü daha düzenli hale getirerek hataları gidermeyi sağlar.



VI yardım penceresini açmayı sağlar.

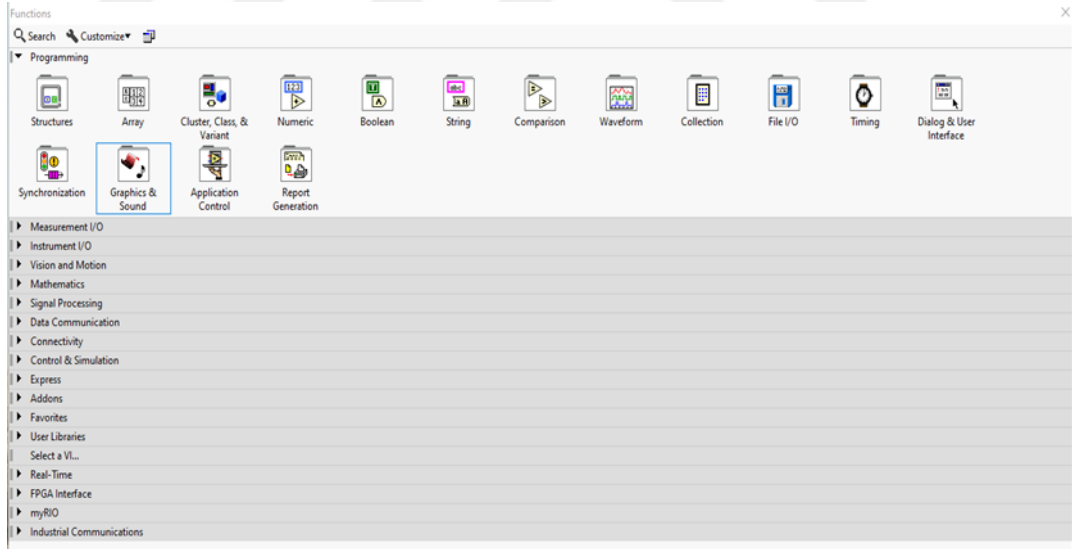
3.2. LabVIEW Ön Panel

Şekil 3.3’de verilen LabVIEW ön paneli giriş ve çıkış terminallerini, kontrol cihazlarını, kumandaları ve göstergeleri içerir. Gerçek ortamda bulunan birçok test aletini sanal ortamda kullanmayı sağlayan kısımdır. Genel olarak blok şemasında yazılan kodların sonuçlarının izlendiği kısımdır. Bilgisayardan klavye ve fare yardımıyla bilgiler girilebilir ve sonuçlar alınabilir.



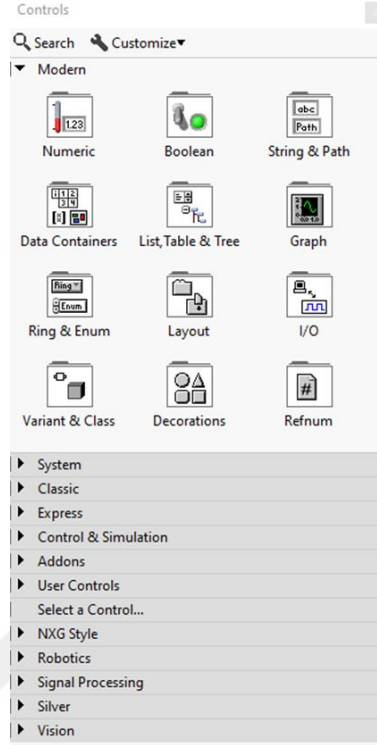
Şekil 3.3. LabVIEW Boş Ön Panel

LabVIEW 'deki bu iki kısımda kodlamanın yapılması ya da sonuçların alınması için iki palet bulunur. Bunlardan bir tanesi sadece blok şemasında bulunan Şekil 3.4'de verilen fonksiyon paletidir. Bu palet de kodlama yapılırken kullanılacak nesneler yer alır. Genel olarak programlamanın ana kısmı burasıdır.



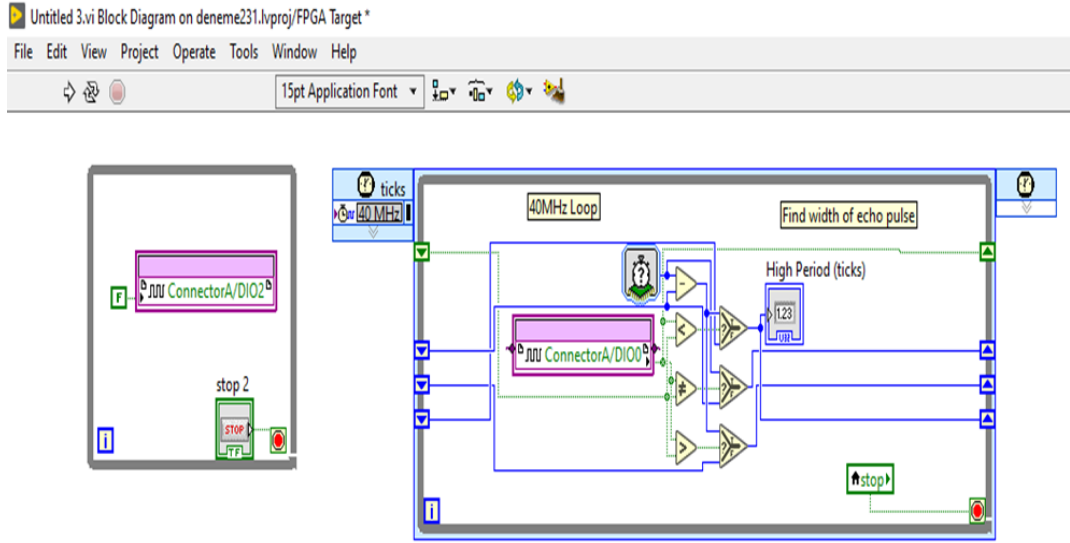
Şekil 3.4. LabVIEW Fonksiyon Paleti

LabVIEW 'de bulunan diğer palet ise Şekil 3.5'de verilen kontrol paletidir. Bu palet sadece ön panelde bulunur ve blok şemasında oluşturulan nesnelerin sonuçlarını gösterir. Grafikler, nümerik sonuçlar, ledler ve butonlar gibi işlemin sonucunu yansıtan göstergeler bulunur.

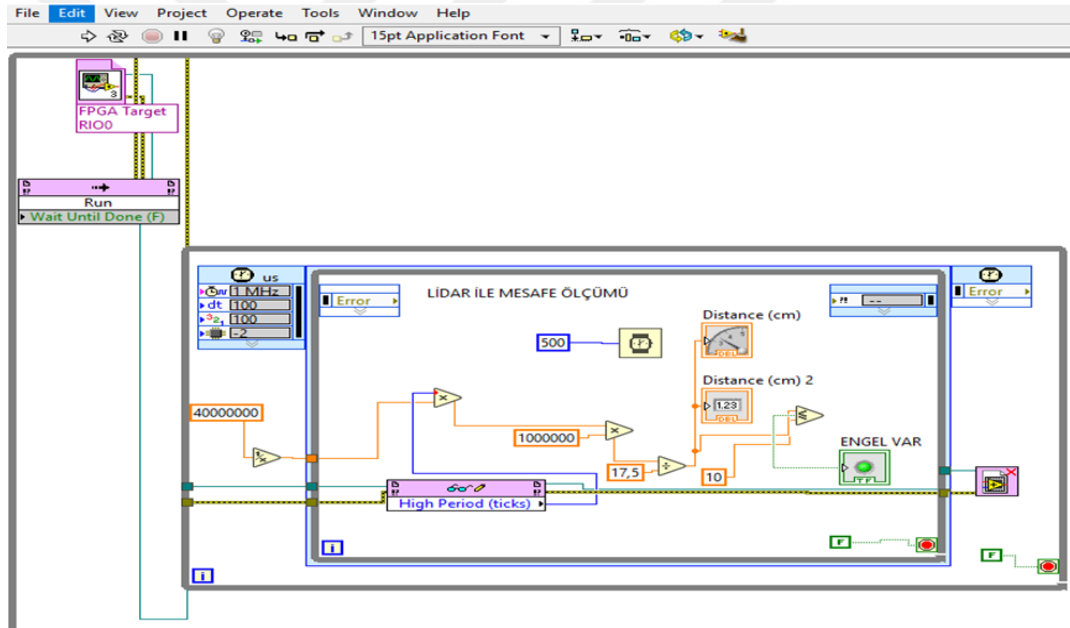


Şekil 3.5. LabVIEW Kontrol Paleti

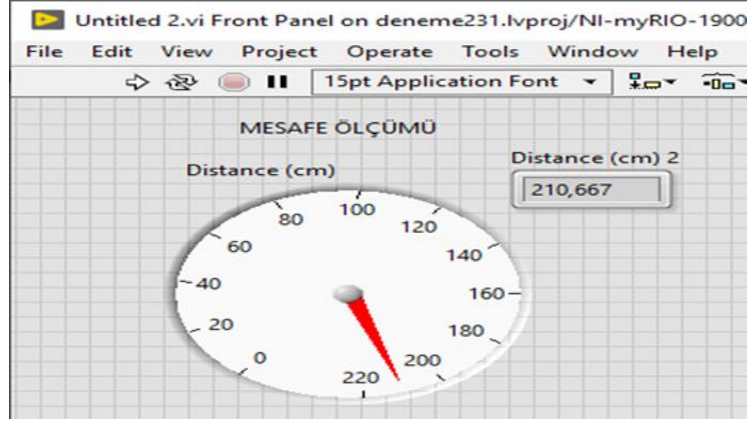
LabVIEW 'de fonksiyon paleti kullanılarak blok şemasında kodlama yapılır. Ardından yazılan bu programın giriş çıkışları kontrol paleti kullanılarak ön panelde kontrol edilir. Ön panelde veri girişi sağlanabilir, sonuçlar okunabilir ve grafiksel sonuçlar alınabilir. Fonksiyon paleti ve kontrol paleti LabVIEW 'in kullanım amacına göre eklentiler indirilerek genişletilebilir. Örneğin bir FPGA kartını kontrol etmek için kullanılacaksa Myrio Toolkit indirilebilir. Myrio Toolkit sayesinde kullanılan kartın giriş çıkışları hazır kütüphaneler ile birlikte gelir. Bu özellik sayesinde de kodlama kolaylaşır. Aşağıda bulunan şekillerde örnek bir uygulama verilmiştir.



Şekil 3.6. LabVIEW Mesafe Ölçümü FPGA Paneli



Şekil 3.7. LabVIEW Mesafe Ölçümü Blok Şeması



Şekil 3.8. LabVIEW Mesafe Ölçümü Ön Panel

Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de LabVIEW ile mesafe ölçümü gösterilmiştir. Şekil 3.6’da FPGA kartının girişlerine uygulanacak sinyaller ve çıkışlarından okunacak sinyaller ile birlikte Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı üzerindeki pinleri belirtilmiştir. Şekil 3.7’de LiDAR mesafe sensöründen alınan PWM değeri anlamlandırılarak mesafe ölçümü sayısal bir ifadeye dönüştürülmüştür. Şekil 3.8’de ise LiDAR mesafe sensöründen okunarak sayısal birer ifadeye dönüştürülen değerler ön panele bir gösterge ile alınmış ve mesafe ölçümü tamamlanmıştır.

4. MOBİL ROBOTLAR

Sürekli değişen ve zorlaşan yaşam şartları nedeniyle insanlar bazı görevleri yerine getirmesi için robotlara ihtiyaç duymaya başlamışlardır. Robot kelimesi ilk olarak bir tiyatro yazarı tarafından bir tiyatro oyununda 1921 yılında kullanılmış ve zorla çalıştırılan işçi anlamına gelmektedir [28]. Robotlar insanlara birçok konuda yardımcı olmaları için tasarlanan akıllı makinelerdir. Kendisine verilen görevi yapmak için programlanır ve kontrol edilirler. Gelişen teknoloji ile birlikte yapay zekâ teknikleri ile kendi kararlarını alacak kadar gelişmişlerdir. Günümüzde hayatımızın her alanında kullanılan bu robotlar birden çok şekilde sınıflandırılabilirler. Örnek olarak kullanım alanlarına, kontrol yöntemlerine, eklem yapılarına ve çalışma prensiplerine göre sınıflandırma çeşitleri vardır. Ancak geçmişten günümüze teknolojinin gelişimi açısından baktığımızda endüstriyel ve mobil robotlar olarak iki sınıfa ayrırabiliriz.

Endüstriyel robotlar tanım olarak programlanabilen, bir yere sabitlenmiş ya da tekerlekleri bulunan robotlardır. Sürekli tekrarlanması gereken ya da sabit bir bölümde yapılan insanların yapamayacağı ya da yaparken iş gücü fazla gerektiren işlerde kullanılmaktadır. Bunun dışında endüstride genel olarak üretim, taşıma, kesme ve montaj bölümlerinde kullanılmaktadır. Endüstride kullanılmaya başlandıktan sonra iş maliyeti azalmış, işlerin yapım süreleri kısalmış ve kayıplar azalmıştır. Diğer bir robot sınıfı ise mobil robotlardır. Mobil robotları endüstriyel robotlardan ayıran özellikleri ise bir ortama bağlı olmamaları ve çevrelerini tanımlayıp bulundukları ortamı anlamlandırmalarıdır. Çevrelerini anlamlandırdıktan sonra bu doğrultuda hareketlerine karar verirler. Mobil robotların çevrelerini anlamlandırabilmelerini sensörler sağlarlar.

Sensörler, ışığın tonu veya robotun başka bir cisme olan uzaklığı gibi ölçülebilir büyüklükleri algılayabilmek için kullanılan cihazlardır. Sensörler, herhangi bir programlama yapılmadığı sürece kullanışsızdır. Alınan verinin düzenlenip bir amaca yönelik çalışmasını sağlayan bir yazılım mutlaka olmalıdır. Sensörlere ek olarak, robotlar aynı zamanda eyleyici (actuators) diye bilinen çıkış cihazlarına da sahiptir. Küçük bir hoparlör veya bir LED veya motorlar “eyleyici (actuators)” olarak düşünülebilir. Eyleyiciler, robotların sensörler tarafından algıladıkları ortama bağlı bilgilere göre cevap vermelerini sağlar.

Mobil robotlar kendi içlerinde kullanım alanları ve yapılarına göre dört ana başlıkta incelenirler. Su mobil robotları, hava mobil robotları, kara mobil robotları ve uzay mobil robotlarıdır. Suda kullanılan mobil robotlar su altında kullanılan mobil robotlar ve su üstünde kullanılan mobil robotlar olarak ikiye ayrılırlar. Su altında kullanılan mobil robotlar genellikle deniz altı keşiflerde kullanılırlar. Su üstünde kullanılan mobil robotlar ise taşımacılık seferlerinde kullanılmaktadır. Havada kullanılan mobil robotlar daha çok askeri alanlarda kullanılmaktadırlar.

Keşif, çevre taraması ve hedef tespiti gibi alanlar en çok kullanıldığı alanlardır. Askeri kullanımları dışında drone olarak da çeşitli amaçlarda kullanılmaktadırlar. Karada kullanılan mobil

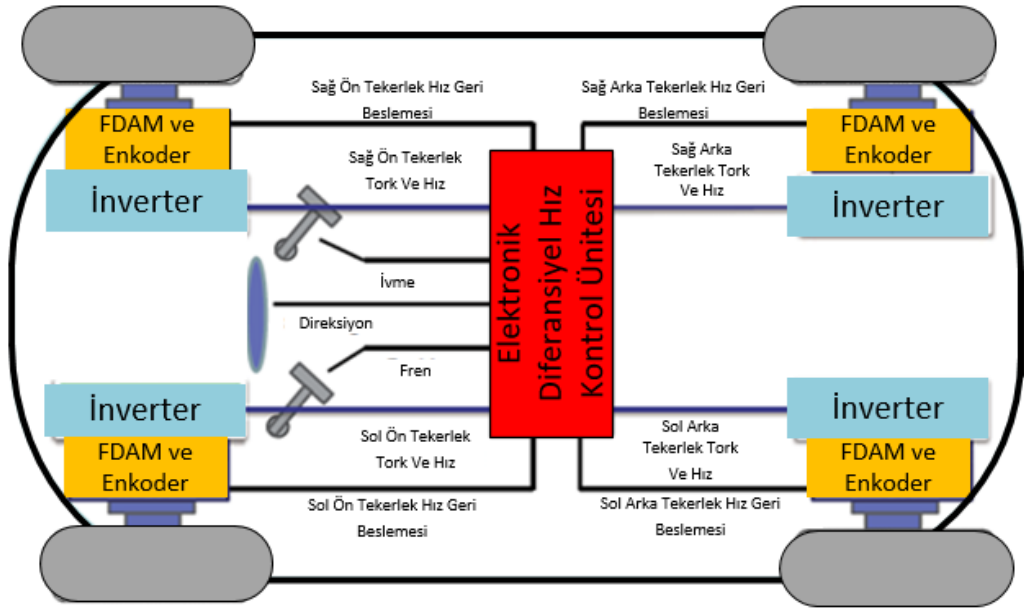
robotlar ise genel olarak kapalı alanda kullanılan mobil robotlar ve açık alanda kullanılan mobil robotlar olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Kapalı alanda kullanılan mobil robotlar taşıma, güvenlik ya da temizlik robotu olarak kullanılmaktadır. Açık alanda kullanılan mobil robotlar ise keşif, coğrafi bilgi sistemlerinde, haritalamada ya da askeri olarak mayın tespitinde ve bomba imhada kullanılabilmektedir. Son bölüm olan uzayda kullanılan mobil robotlar ise yerçekimsiz ortamda kendisine verilen görevleri yerine getirmek için tasarlanan mobil robotlardır [29].

4.1. Elektronik Diferansiyel Sistemler

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv sektöründe de değişimler yaşanmaya başlamıştır. En büyük değişiklik ise kullanılan motor tiplerinde görülmüş ve içten yanmalı motorları kullanan araçlar yerine elektrikli motorları kullanan araçlar üretilmeye başlanmıştır. Elektrikli araçlar çevreye daha az zehirli gaz salmaları, sessiz çalışmaları, yüksek verimli olmaları ve yüksek moment sağlamaları nedeniyle içten yanmalı araçlara göre çok daha avantajlıdırlar [20]. Batarya teknolojisinin gelişmesiyle birlikte kullanım sayıları da oldukça artmaktadır. Elektrikli araçlar ile birlikte mekanik diferansiyel sistemleri yerine elektronik diferansiyel sistemleri kullanılmaya başlanmıştır [21].

Elektronik diferansiyel sistemler araçların kaç çekerli olduğu göz önüne alınarak elektrikli araçlarda eğimin fazla olduğu ya da kötü hava şartları nedeniyle yolların kaygan olduğu durumlarda güç ve momenti tekerlere eşit şekilde dağıtmak için kullanılır. Bir araç viraja girdiği zaman diferansiyel sistemdeki dişliler devreye girerler. Viraja göre dışta kalan tekerleği hızlı iç kısımdaki tekerleği ise yavaş döndürerek aracın virajı sağlıklı bir şekilde almasını sağlarlar. Eğer diferansiyel sistem kullanılmazsa virajı alabilmek için fren yapılması gerekir. Bu durumda da aracın kayması engellenemez. Bu nedenle güvenli bir sürüş için diferansiyel sistem kullanımı çok önemlidir. Ayrıca yakıt tüketimi ve lastik ömrünün uzatılabilmesi içinde bu sistemin kullanılması önemlidir.

Elektronik diferansiyel dört çekerli araçlarda mekanik diferansiyele göre çok daha iyi bir performans göstermişleridir. Her tekerin torkları ve hızlarının ayrı ayrı kontrol edilebiliyor olması dört çekerli araçlara çok iyi bir manevra kabiliyeti kazandırmıştır ve güç aktarımındaki kayıplar yok edilerek mekanik diferansiyel sistemlere göre çok daha verimli bir sürüş elde edilmiştir [23].

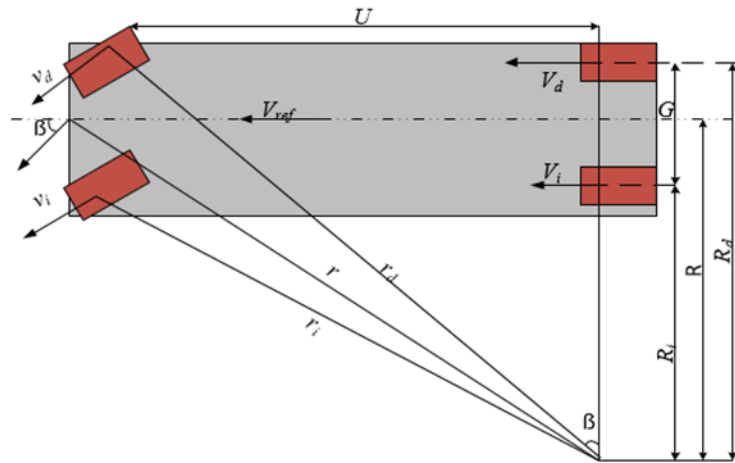


Şekil 4.1. Dört Çekerli Mobil Robota Uygulanan Elektronik Diferansiyel Sistemi

Genel olarak sadece iki tekerleğe uygulanan elektronik diferansiyel sisteminin Şekil 4.1’de dört çeker bir mobil araca uygulanma şekli gösterilmiştir. Elektronik diferansiyeli açıklayan model Ackermann-Jeantand tarafından ortaya atılmıştır.

4.1.1. Ackermann-Jeantand Modeli

Araç hızının değişimine ve direksiyon açısına göre, dört çeker sistemdeki tekerlerin hızlarını hesaplamak için Şekil 4.2’de verilen Ackermann-Jeantand modeli kullanılmaktadır. Bu modelde kullanılan değişkenler Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Ackermann-Jeantand Modeli

Tablo 4.1. Ackermann- Jeantand Modeli Parametreleri

V_{ref}	Mobil Aracın Referans Hız Değeri
β	Direksiyon Açısı
U	Dikey Olarak İki Teker Arasındaki Uzaklık
G	Yatay Olarak İki Teker Arası Uzaklık
R	Arkada Bulunan Aksın Merkezinin Direksiyon Yarıçapı
R_i	Arkadaki Tekerlerin İç Yarıçapı
R_d	Arkadaki Tekerlerin Dış Yarıçapı
V_i	İç Tarafta Bulunan Arka Tekerleğin Hızı
V_d	Dış Tarafta Bulunan Arka Tekerleğin Hızı
r	Önde Bulunan Aksın Merkezinin Direksiyon Yarıçapı
r_i	Öndeki Tekerlerin İç Yarıçapı
r_d	Öndeki Tekerlerin Dış Yarıçapı
v_i	İç Tarafta Bulunan Ön Tekerleğin Hızı
v_d	Dış Tarafta Bulunan Ön Tekerleğin Hızı

Mobil robotun orta noktasından belirlenen hız değeri (V_{ref}) olarak tanımlanmıştır. Direksiyon açısı (β) direksiyon sıfır konumundayken ön aksın merkezinin durumuna göre tanımlanırsa tekerlekler için denklemler Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$R = \frac{U}{\tan(\beta)} \quad (4.1)$$

$$R_i = R - \frac{G}{2} \quad (4.2)$$

$$R_d = R + \frac{G}{2} \quad (4.3)$$

Direksiyon açısı (β)'nın değeri küçük ise iç ve dış tekerleğin direksiyon açılal hızlarının eşit olduğu söylenebilir. Arka tekerlekler için doğru bir dönme hareketi elde edebilmek için Denklem 4.4'de kullanılabilmektedir.

$$\frac{V_i}{V_d} = \frac{R_i}{R_d} \quad (4.4)$$

Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 'deki değerler ile Denklem 4.4'deki değerler kullanılarak, iki arka tekerleğin doğrusal hızları Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'daki ile hesaplanabilir.

$$V_i = V_{ref}(1 - \frac{G \tan(\beta)}{2U}) \quad (4.5)$$

$$V_d = V_{ref}(1 + \frac{G \tan(\beta)}{2U}) \quad (4.6)$$

Arka tekerleklerin hesaplandığı gibi ön tekerleklerde Denklem 4.7, Denklem 4.8 ve Denklem 4.9'daki gibi hesaplanabilir.

$$r = \sqrt{U^2 + R^2} \quad (4.7)$$

$$r_i = \sqrt{U^2 + (R - \frac{G}{2})^2} \quad (4.8)$$

$$r_d = \sqrt{U^2 + (R + \frac{G}{2})^2} \quad (4.9)$$

$\tan(\beta) = \frac{U}{R}$ Olduğu için Denklem 4.7, Denklem 4.8 ve Denklem 4.9 düzenlenerek Denklem 4.10, Denklem 4.11 ve Denklem 4.12'ye dönüştürülebilir.

$$r = U\sqrt{1 + \cot(\beta)^2} \quad (4.10)$$

$$r_i = U\sqrt{1 + (\cot(\delta) - \frac{G}{2U})^2} \quad (4.11)$$

$$r_d = U\sqrt{1 + (\cot(\beta) + \frac{G}{2U})^2} \quad (4.12)$$

Ön tekerlerin arka tekerlekler ile birlikte direksiyonun sıfır noktasında aynı açısal hız ile yönlendirildikleri varsayabilir. Ancak ayrı bir şekilde bağımsız dönmesi için Denklem 4.13 ve Denklem 4.14'de gösterildiği gibi bir ilişki sağlanmalıdır.

$$v_i = \frac{\sqrt{1 + (\cot(\beta) - \frac{G}{2U})^2}}{\sqrt{1 + \cot(\beta)^2}} \quad (4.10)$$

$$v_d = \frac{\sqrt{1 + (\cot(\beta) + \frac{G}{2U})^2}}{\sqrt{1 + \cot(\beta)^2}} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki denklemler sonucunda dört tekerleğin dönüşü denklemler sonunda hesaplanan diferansiyel hızı izlemelidir. Düz sürüş sırasında dört tekerleğe de gelen hız değeri eşittir. Doğrusal

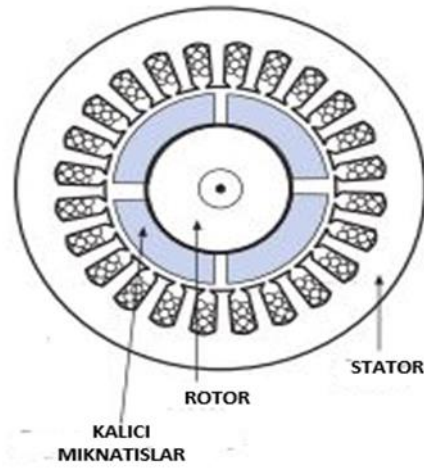
hızları eşitse dört tekerleğin açısal hızları da eşit demektir. Aracın orta noktasındaki hız referans hız olarak kabul edilir ve elektronik diferansiyel için hesaplan hız değeri dört tekerlek içinde kontrol edilir. Böylece elektronik diferansiyel sistemi kullanılarak dört çekerli bir mobil robot için hız kontrolü yapılmış olur.

4.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru

Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM), doğrusal moment hız karakteristiği, yüksek güç/hacim oranı, yüksek verim değeri ve DC motorlardaki fırça-kolektör yapısını bulundurmaması gibi üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükleri nedeniyle FDAM'lar robot kollar, elektrikli araçlar, savunma sanayii ve mobil robotlar başta olma üzere birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [30].

FDAM'ler uzun ömürlüdürler, gürültü olmadan çalışırlar, yüksek devirlerde sorunsuz çalışabilirler, diğer motorlara göre boyutları daha küçüktür ve momentleri daha yüksektir, hız kontrolleri tork değerleri değişmeden yapılabilir, çok az ısınırlar, verimlilikleri yüksektir, bakıma ihtiyaç duymazlar, daha az arıza verirler ve sürtünme yoktur. Ancak FDAM'ların dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan biri maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte maliyet azalmış ve bu sorun çözülmüştür. FDAM'larda DC motorda kullanılan fırçanın-kolektör yapısının yaptığı görevi elektronik bir denetleyici üstlenir. Bu nedenle en az bir adet motor sürücü devresine ihtiyaç duyarlar. FDAM'ların kontrol edilebilmeleri için konum bilgisi gereklidir. Bu konum bilgisi bir adet hall sensörü ya da enkoder ile alınabilir [31].

Bir FDAM, sabit mıknatıslı rotor, üç faz sargılı stator, konum belirleyici kısım (enkoder ya da hall sensörü gibi) ve motor sürücüsü yapılarından oluşmaktadır. Statorda bulunan sargılar rotorun pozisyonuna göre enerjilendirilir. Bu nedenle rotorun hangi konumda olduğunu bilmek çok önemlidir. Bu konum bilgisi bir enkoder ya da hall sensörü ile belirlenir. Konum bilgisine göre stator enerjilendirilir ve stator ile rotor oluşan manyetik alanın etkisiyle aynı frekansta hareket ederler. Sensör kullanmadan rotor pozisyonu belirlenerek FDAM çalıştırılabilir ancak bu yöntem kullanılırsa tam bir konum kontrolü ya da hız kontrolü yapmak mümkün değildir. Sensörsüz kontrolde çok yüksek hızlara ya da ivmelere çıkılamaz [32].



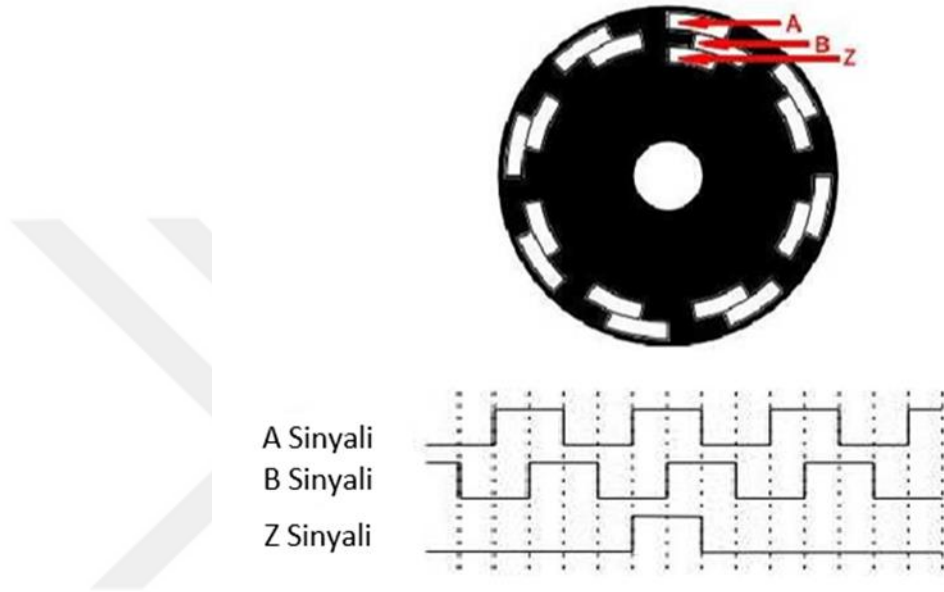
Şekil 4.3. FDAM Stator ve Rotor

Şekil 4.3’de gösterildiği gibi FDAM’larda dış tarafta sabit bulunan kısım statordur. Stator iki kısımdan oluşur. Bunlardan biri sargılar diğeri nüvedir. Yapısı gereği asenkron motorlara benzerlik göstermesine rağmen sargıların dağılımı açısından farklılık gösterirler. Asenkron motorlarda yıldız üçgen bağlantıları vardır. FDAM sargıları da asenkron motorlarda olduğu gibi bu şekilde bağlanabilirler. FDAM’lar kaç fazlı olduklarına göre, rotorlarında bulunan kutup sayılarına göre, statorlarının kaç oluklu olduklarına göre ve sargıların bulunduğu şekillere göre seçilirler. FDAM’larda bulunan nüve yapıldığı çeliğin şekillendirilmesi sonucu meydana gelir. Nüvenin içerisinde oluklar bulunur ve bu oluklara stator sargıları yerleştirilir. Statorda çok fazla oluk bulunur. Statorun ölçüleri motorda aranan güç değerine göre değişiklik göstermektedir. Güç artarsa statorunda boyutu artmaktadır [33].

Şekil 4.3’de görülen FDAM’larda kalıcı mıknatısların olduğu ve motorun dönen kısmının bulunduğu yere rotor denir. FDAM’lar genellikle bir veya birden çok sabit mıknatıslı olarak seçilirler. Bu sabit mıknatıslar kutup çifti olarak da belirtilebilirler. Örneğin en çok kullanılan FDAM çeşitlerinden bir tanesi yedi kutup çiftli yani on dört mıknatıslı olarak üretilmektedir. Bu rotorlarda fırça bulunmaz ve buda bakım ihtiyacını ortadan kaldırır. Ayrıca sürtünmeden dolayı oluşan kayıpları ve ark oluşumunu da ortadan kaldırır.

FDAM’ların stator pozisyonları rotorun konumuna göre enerjilendirilirler. Rotorun konum bilgisini öğrenmek için kullanılan birçok çeşit algılayıcı vardır. Bu algılayıcılardan en fazla kullanılan enkoderlar ve hall sensörlerdir. Bunların arasından seçim yapabilmek için algılayıcının kullanılacağı ortam şartları, algılayıcının fiziksel büyüklüğü, çalışmanın hangi hassaslıkta ve doğrulukta çalışması gerektiği, algılayıcının çektiği akım ve güç gereksinimi ve algılayıcının fiyatı gibi durumlar göz önüne alınmalıdır. Bu algılayıcılar dışında günümüzde sensörsüz kullanımda mevcuttur. Ancak sensörsüz kontrol yapıldığı zaman hız ve konum bilgisi alınamayacağı için kontrol hâkimiyetini zayıflatmaktadır [34].

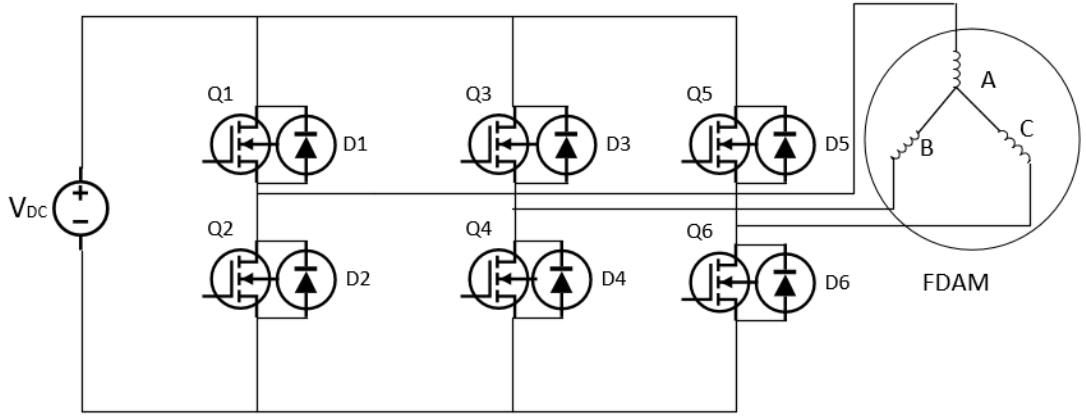
Enkoderler diğer bir adlarıyla optik sensörler kullanılarak rotorun pozisyonu açısal olarak hassas bir şekilde ölçülür. Enkoderler motor miline monte edilirler. Enkoder içinde bulunan disk üzerinde delikler bulunur. Bu deliklerin sıklığı hassasiyeti artırır. Genelde üç adet sinyal kanalı bulunur bunlar A, B ve Z kanalı olarak adlandırılırlar. A ve B kanalları hız ya da konum ölçümü için kullanılırken Z kanalı motorun kaç devir döndüğünü saymaktadır. Genel olarak enkoderlar artımsal ve mutlak olmak üzere iki şekildedirler.



Şekil 4.4. Artımsal Enkoder Sinyalleri

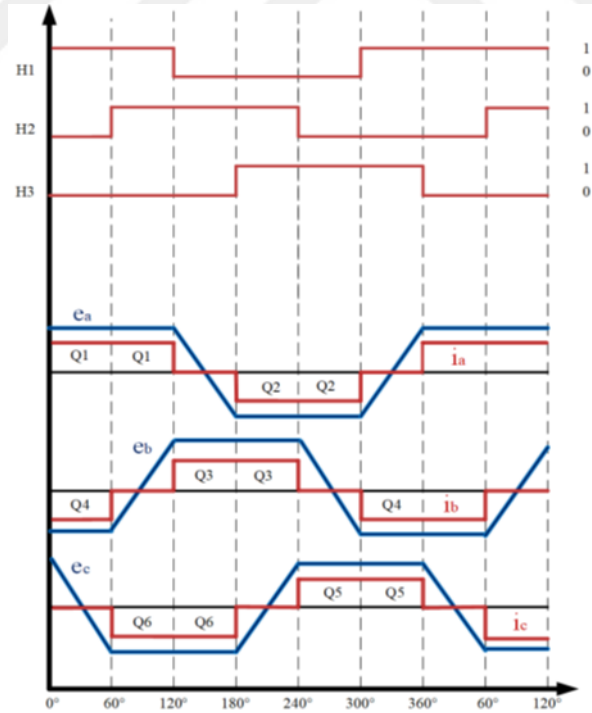
Şekil 4.4’de görüldüğü gibi artımsal enkoderlar karşıdan gelen sinyali üç ayrı kanal ile anlamlandırarak ölçüm yaparlar. Genel olarak FDAM ile enkoder akuple edilerek kullanılırlar.

Rotorun konumu hall sensörü ya da enkoder ile tespit edilerek stator sargılarından geçen akımın yönü değiştirilir ve rotorun hareketlenmesi sağlanır. FDAM için kullanılan motor sürücü kartı kendi çıkışına bağlı olan altı tane anahtara enkoder ya da hall sensöründen aldığı bilgiye göre iletim ya da kesim sinyali gönderir. Bu sinyaller ile FDAM kapalı çevrim olarak kontrol edilmektedir. Anahtar olarak mosfetlerin kullanıldığı bir sürücü devresi Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Mosfetler İle Yapılmış FDAM Sürücü Devresi

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi anahtar olarak kullanılan mosfetler rotorun bulunduğu konumuna göre sırası ile tetiklenirler. Motor sürücü kartı tetiklemeyi yaptıktan sonra rotorun konumu hakkında hall sensörü ya da enkoderdan bilgi alır. Alınan bu bilgiye göre ilk olarak birinci faza pozitif gerilim, ikinci faza negatif gerilim uygular ve üçüncü faza herhangi bir gerilim uygulamaz [35]. Hall sensöründen alınan konum bilgisine göre anahtarlama sinyalleri ve zıt EMK gerilimleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Anahtarlama Sinyalleri ve Zıt EMK gerilimleri

Şekil 4.6’ya göre oluşturulan anahtarlama tablosu Tablo 4.2’de verilmiştir.

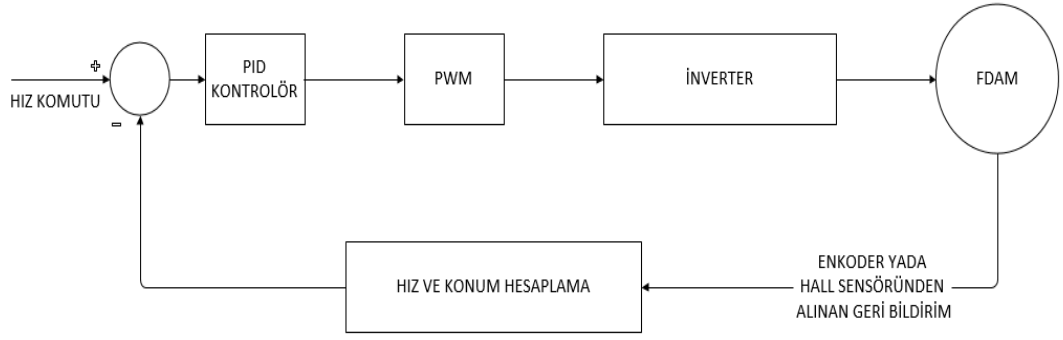
Tablo 4.2. Anahtar Konumları Tablosu

ANAHTAR PERİYOTLARI	HALL SENSÖRÜ			ANAHTARLARIN KONUMLARI						FAZ AKIMLARI		
	H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	A	B	C
0-60	1	0	0	1	0	0	1	0	0	+	-	OFF
60-120	1	1	0	1	0	0	0	0	1	+	OFF	-
120-180	0	1	0	0	0	1	0	0	1	OFF	+	-
180-240	0	1	1	0	1	1	0	0	0	-	+	OFF
240-300	0	0	1	0	1	0	0	1	0	-	OFF	+
300-360	1	0	1	0	0	0	1	1	0	OFF	-	+

FDAM'ların çalışma performansını ve verimlerini etkileyen en önemli elemanları motor sürücü kartlarıdır. Ancak bu motor sürücü kartlarının da performansını anahtarlama devreleri belirlemektedir. Doğru ve kaliteli bir anahtarlama devresi bulunan motor sürücü kartlarının performansları oldukça yüksektir [36].

4.2.1. FDAM Kapalı Çevrim Kontrolü

FDAM'ların istenilen herhangi bir hızda hareket edebilmesi için kapalı çevrim kontrol yapılması gerekmektedir. FDAM'nin kapalı çevrim hız kontrolü Şekil 4.7'de gösterilmiştir. FDAM'ların hızları belirlenen PWM değerine göre değişmektedir. Sisteme belirli bir referans hız değeri verilir. Bu verilen hız değeri gönderilen PWM sinyaline göre ayarlanır [18]. Enkoder ya da hall sensörü yardımıyla geri bildirim alınır. Böylece kapalı çevrim kontrol gerçekleştirilir. Kapalı çevrim hız kontrolü yapıldığı için FDAM hız ayarı istenilen hassasiyette ayarlanabilir ve istenilen hız değerlerine ulaşabilir. Böylece mobil robot hareket halinde olduğu zaman daha doğru ve hassas dönüşler yapabilmekte istenilen hız değerine ulaşabilmektedir.



Şekil 4.7. FDAM'ın Kapalı Çevrimli Kontrol Diyagramı

PID endüstriyel ortamda en yaygın kullanılan kontrolör biçimidir. Basit bir yapıya sahip olması, değişken sayısının az olması ve fiziksel gerçeklemenin mümkün ve kolay olması gibi özellikleri sayesinde çok fazla tercih edilmektedir. PID üç ayrı parametreden oluşmaktadır. Bunlar oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) parametreleridir. Bir PID denetleyici çıkıştan gelen geri besleme sinyali ile referans sinyal olan giriş sinyalini karşılaştırır ve bir adet hata oluşturur. Bu oluşan hatayı PID denetleyicisi en aza indirmeye çalışır ve çıkışa gönderir. Bu işlem hata en az seviyeye gelene kadar devam etmektedir [36].

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.12)$$

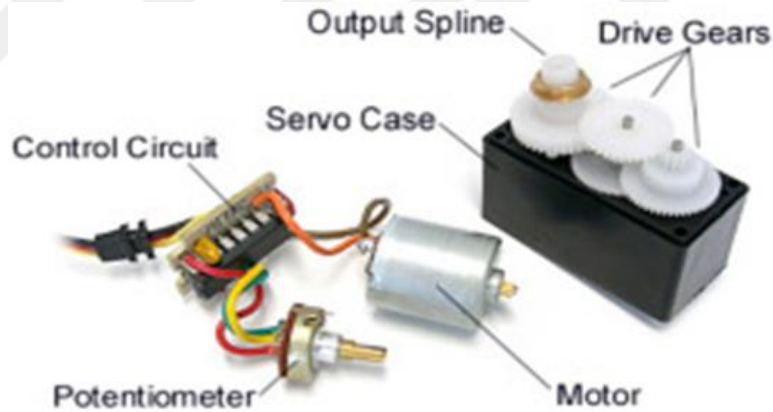
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.13)$$

PID kontrolör matematiksel denklemleri Denklem 4.12 ve Denklem 4.13' de ifade edilmiştir. Burada $U(t)$ kontrol sinyalini, $r(t)$ referans sinyalini ve $e(t)$ ise hata sinyalini göstermektedir. PID kontrol yönteminde çıkış sinyalinin referans sinyalini takip edebilmesi için Denklem 4.12'deki K_p , K_i ve K_d parametrelerinin sisteme göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerden K_p oransal teriminin $e(t)$ hata sinyali ile K_i integral teriminin $e(t)$ hata sinyalinin integrali ile ve K_d türev teriminin de $e(t)$ hata sinyalinin türevi ile çarpılması ve bu değerlerin toplamıyla $U(t)$ PID kontrol çıkış sinyali elde edilir. Bu parametrelerin genel olarak kullanım amaçları sistemin en az hataya en kısa sürede ve en az salınım yaparak gelmesini sağlamaya çalışmaktır.

4.3. Servo Motor

Servo sistem, mekanizmalardaki pozisyon, hız ve ivme kontrolünü hatasız bir şekilde yapan tahrik sistemi olarak tanımlanır. Servo sistemler, komut verildiğinde kısa sürede ulaşılacak istenilen pozisyonu alması ve yeni bir komut gelmediği sürece bulunduğu konumu koruması için tasarlanmışlardır. Servo motorlar, robot teknolojilerinde en çok tercih edilen motor çeşidi olmakla birlikte, RC (Radyo Control) uygulamalarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. RC Servo Motorlar ilk olarak uzaktan kumandalı model araçlarda kullanılmışlardır [37].

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi servo motorların içerisinde motorun hareketini sağlayan bir DC motor bulunmaktadır. Bu motorun dışında bir dişli mekanizması, potansiyometre ve bir motor sürücü devresi bulunmaktadır. Potansiyometre, motor milinin dönüş açısını ölçmek için kullanılmaktadır. Servo içerisindeki DC motor hareket ettikçe potansiyometre dönmekte ve kontrol devresi motorun bulunduğu pozisyon ile istenilen pozisyonu karşılaştırarak motor sürme işlemini gerçekleştirmektedir. Genellikle çalışma açıları 180 derece ile sınırlıdır fakat 360 derece çalışma açısına sahip özel amaçlı servo motorlar da vardır. Servo motorlar genellikle 4.8-6 V DC gerilim ile çalışmaktadırlar. 7.4 V ve daha yüksek gerilimle çalışan servolar da bulunmaktadır.

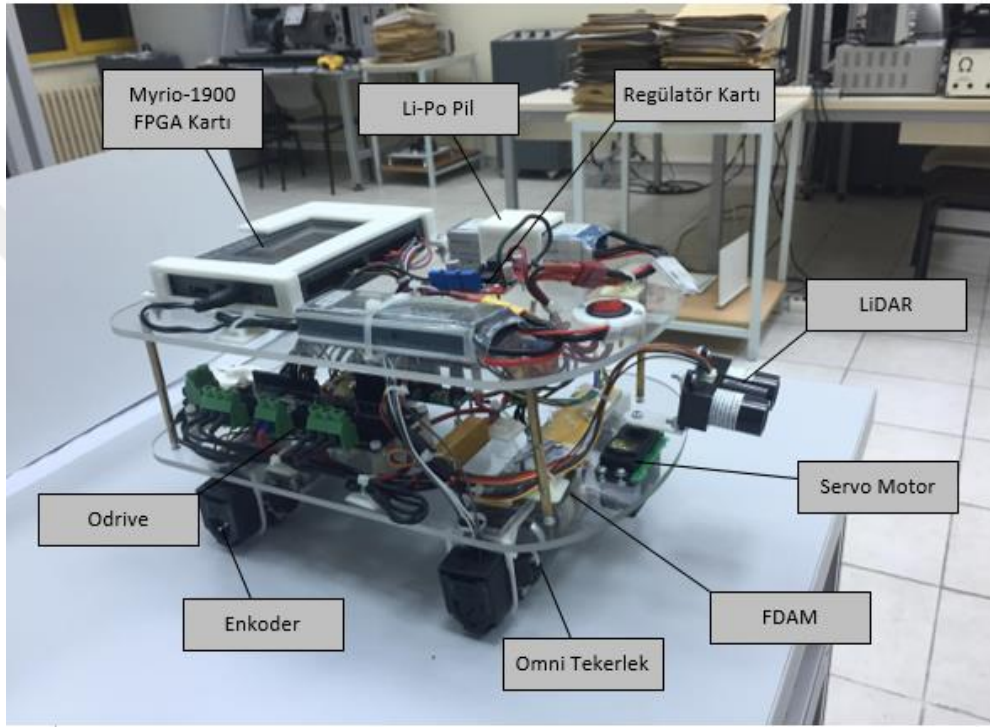


Şekil 4.8. Servo Motorun Yapısı [38]

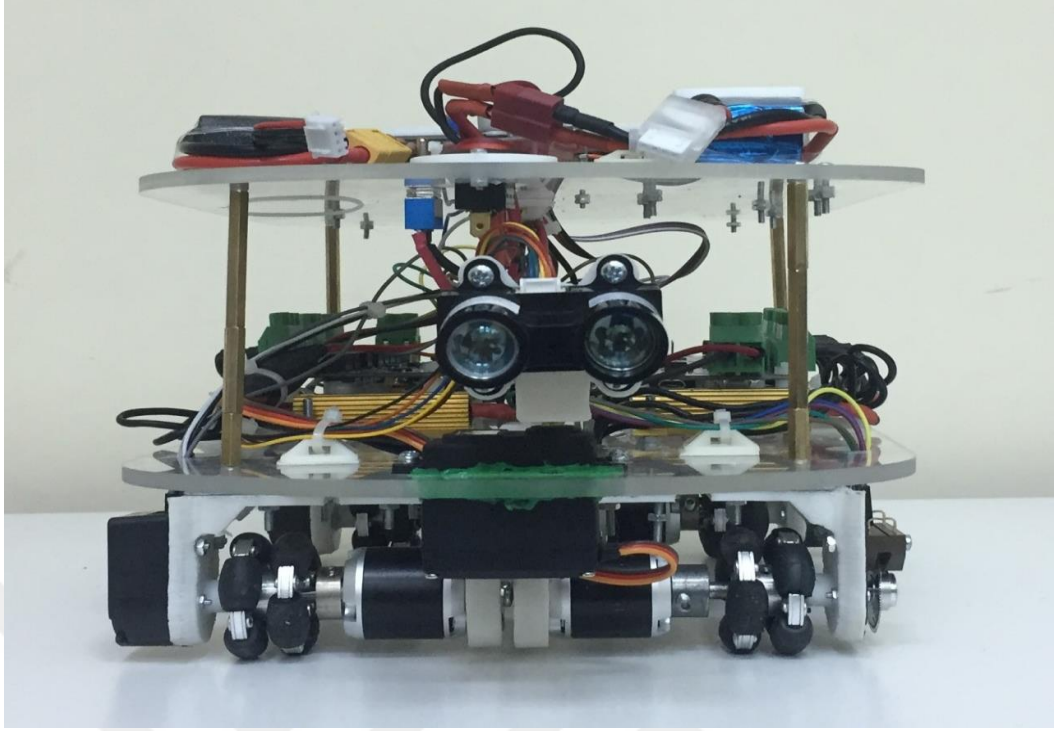
Servo motorlar PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyali ile kontrol edilmektedirler. Bu PWM sinyalleri bir mikro kontrolörden veya uzaktan kumandadan sağlanabilmektedir. Servo motorlar, her 20 ms içerisinde bir pals değeri okumaktadır. Pals genişliği motorun dönüş açısını belirlemektedir. Örnek olarak 1.5 ms’lik bir pals motorun 0 derece konumuna, 2 ms’lik pals 90 derece konumuna, 1 ms’lik pals ise -90 derece konumuna gitmesine neden olur. Servo motorlar hareket etmeleri için bir komut aldıklarında önce istenilen pozisyona hareket ederler, sonrasında ise o pozisyonda kalırlar. Bulundukları pozisyonu korurken kendilerine dışarıdan bir güç uygulandığında bu güce direnirler.

5. MATERYAL VE METOT

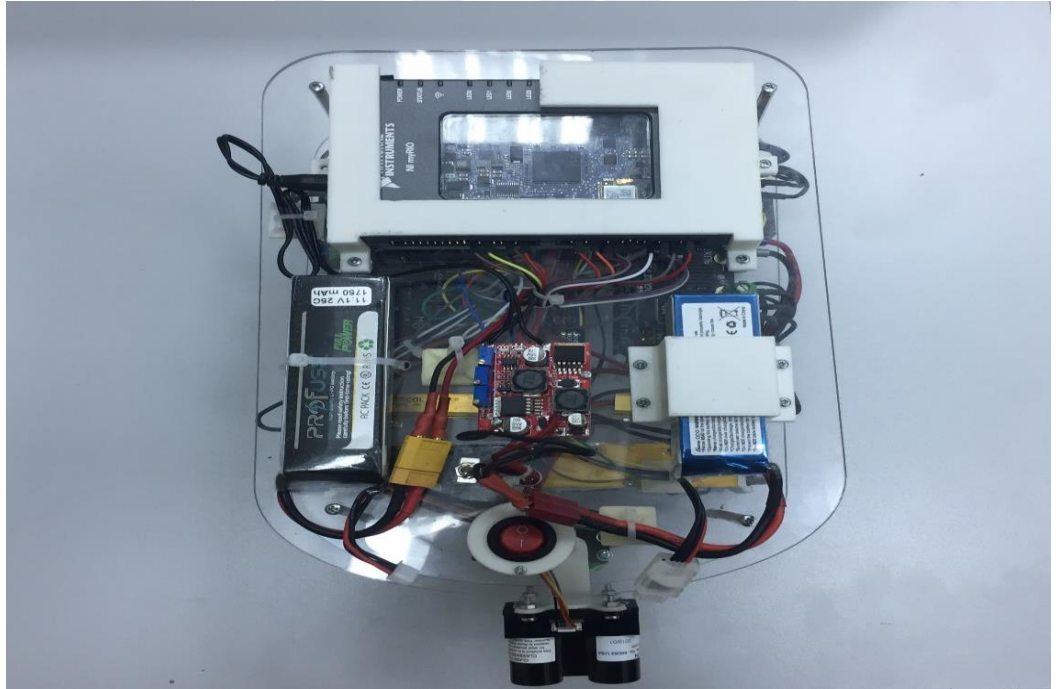
Bu çalışmada tasarlanan ve üretilen FDAM ile hareket ettirilen dört çeker mobil robotun yandan görünüşü Şekil 5.1’de, önden görünüşü Şekil 5.2’de ve üstten görünüşü Şekil 5.3’de verilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi üst plakada Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı, iki adet Li-Po pil ve DC-DC voltaj regülatör kartı bulunmaktadır. Alt plakada ise iki adet Odrive motor sürücü kartı ve RC servo motorun üzerine monte edilmiş LiDAR bulunmaktadır.



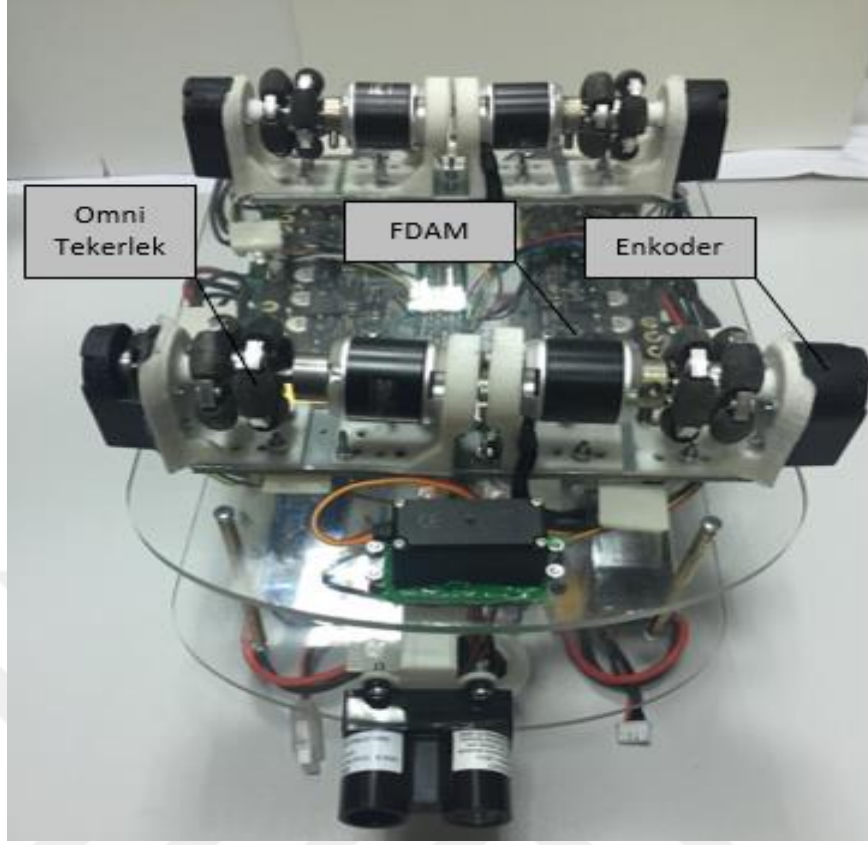
Şekil 5.1. Mobil Robotun Yandan Görünüşü



Şekil 5.2. Mobil Robotun Önden Görünüşü



Şekil 5.3. Mobil Robotun Üstten Görünüşü



Şekil 5.4. Mobil Robotun Altın Görünüşü

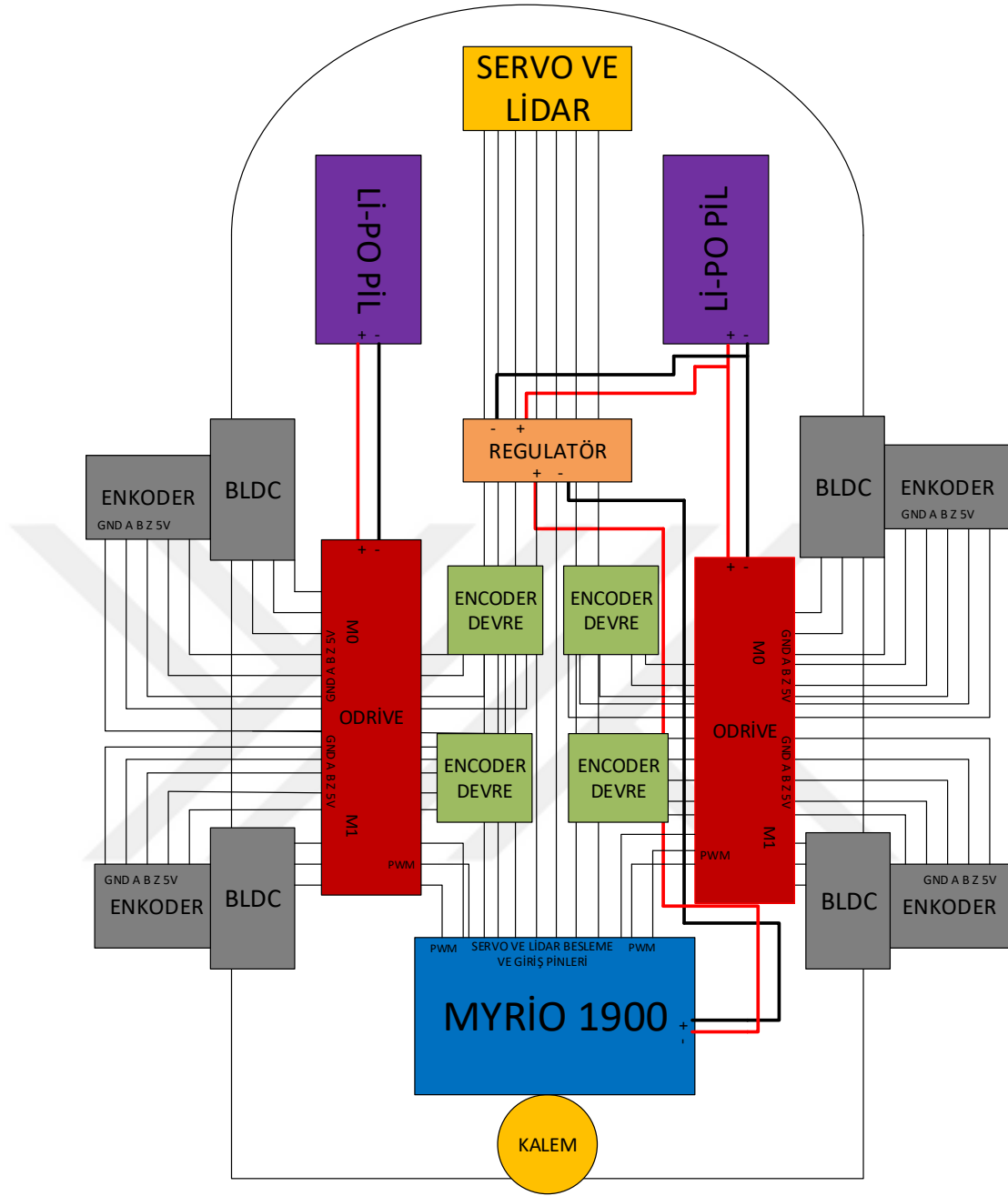
Şekil 5.2’de görüldüğü gibi mobil robotun her bir tekerinde teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilen iPOWER firmasının üretmiş olduğu 210 W gücünde iBM2217Q outrunner (dıştan rotorlu) FDAM ve teknik özellikleri Ek-1’de verilen AVAGO firmasının üretmiş olduğu HEDS-5540-A01 enkoder Omni tekerlek ile akuple edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Omni tekerlek yapısı ile tekerleklere 360 derece hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Hem yatay hem dikey hareket edebilirler. Tekerlekler çift sıralı ve sekiz adet hareketli aksamdan oluşmaktadır. Mobil araçlar için oldukça hassas ve doğru bir dönüş sağlayabilirler. Şekil 5.3’de görülen butonlar mobil robotun açma/kapama düğmeleri olarak kullanılmaktadır.

Şekil 5.4’de mobil robotun altın görünüşü verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Omni tekerlek enkoder ve FDAM ile akuple edilmiş ve çalıştırılmıştır. Şekil 5.5’de verilen mobil robotun bağlantı şemasında görüldüğü gibi mobil robotun enerji ünitesi olarak 2 adet Li-Po pil (3S 11.4 V, 1.80 A) kullanılmıştır. Bu Li-Po pillerden bir tanesi Odrive motor sürücü kartlarından birini beslemektedir. Diğer Li-Po pil ise regülatör kartı üzerinden Myrio-1900 FPGA geliştirme kartını ve diğer Odrive motor sürücü kartını beslemektedir. Li-Po pillerin tek şarj ile ortalama iki saat boyunca sistemi enerjilendirdiği yapılan deneysel çalışmalar sırasında gözlemlenmiştir. Servo motor ve LiDAR ise doğrudan Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı üzerinden beslenmektedir. FDAM’lar direkt olarak

Odrive motor sürücü kartına bağlanmışlardır. Enkoderlar ise dirençler ile oluşturulan enkoder devresinden geçerek Odrive motor sürücü kartlarına bağlanmaktadır.

Tablo 5.1. iBM2217Q FDAM Teknik Özellikleri

Motor Kv	880 kv
Motor İç Direnç	107 mΩ
Motorun Yüksüz Çektiği Akım	0.8 A
Motorun Maximum Çektiği Akım	20 A
Motorun sürekli çektiği akım	14.8 A
Motorun Maximum Gücü	210 W
Motorun Kutup Çifti Sayısı	7
Motorun Ağırlığı	94 gram
Motorun Ölçüleri	28x36 mm
Motorun Şaft Çapı	4 mm



Şekil 5.5. Mobil Robotun Bağlantı Şeması

FDAM'lar Odrive ile kontrol edilmektedir. Enkoder FDAM'ların konum bilgisini Odrive motor sürücü kartına göndermektedir. Odrive motor sürücü kartı Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı tarafından gönderilen PWM sinyalleri ile iki adet FDAM'ın kapalı çevrim hız kontrolünü gerçekleştirmektedir.

5.1. Mobil Robot Kontrolünde Kullanılan FPGA'nın Özellikleri

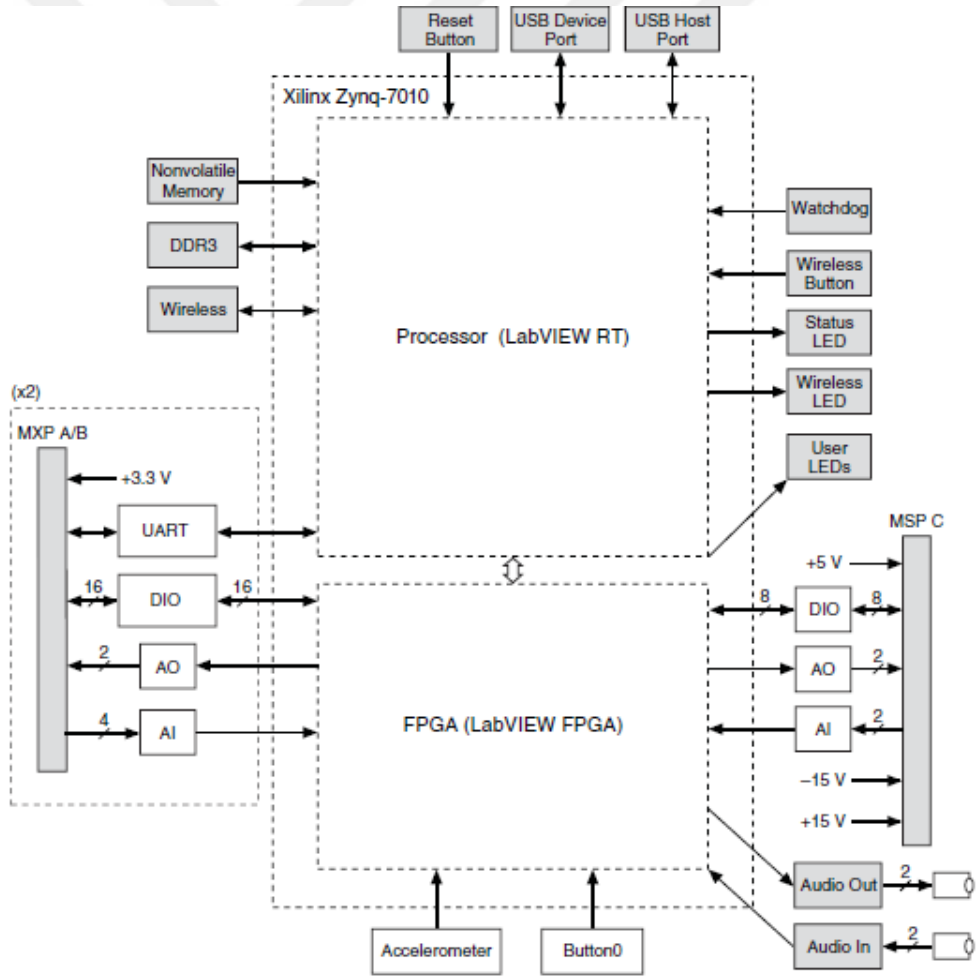
Bu çalışmada mobil robotun kontrolü için Şekil 5.6' da verilen National Instruments firması tarafından üretilen Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır. Bu kart, diğer FPGA geliştirme kartlarından farklı olarak FPGA'nın yanı sıra bir ARM işletim sistemine de sahiptir. Bu nedenle sayısal çözümler ile bağlantı kısımları birbirinden ayrı olarak yapılabilmektedir. Böylece programlaması kolay ve anlaşılır bir şekilde yapılabilmektedir. Karmaşık denklemlere veya satırlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Sadece bloklar ile programlama yapılabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan FPGA geliştirme kartının bazı özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Myrio-1900 FPGA Geliştirme Kartının Özellikleri

MYRIO-1900 FPGA KARTI	
İşlemci Tipi	Dual-Core ARM Cortex-A9
İşlemci Hızı	667 MHz
İşlemci Çekirdek Sayısı	2 Adet
Kalıcı Hafıza	512 MB
Ram Hafızası	256 MB
FPGA Tipi	Xilinx Z-7010
Ram Frekansı	533 MHz
Ram Veri Bant Genişliği	16 Bit
Dijital Giriş/Çıkış	40 Adet
Analog Giriş/Çıkışlar	10 Adet/6 Adet
Ses Giriş/çıkışı	1 Adet/1 Adet



Şekil 5.6. Myrio-1900 FPGA Geliştirme Kartı



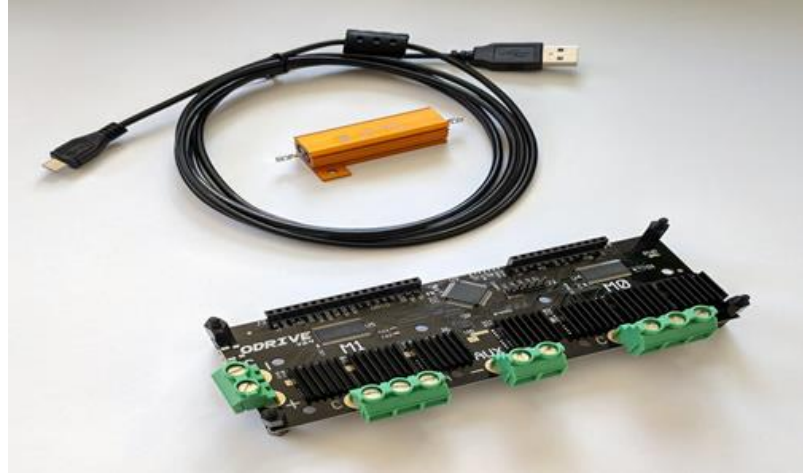
Şekil 5.7. Myrio-1900 İç Yapısı

Myrio-1900 FPGA geliştirme kartının iç yapısı Şekil 5.7’de gösterildiği gibidir. Myrio-1900 kartı sayısal işlemler için ARM Cortex-9 yapısına sahip işlemciyi kullanırken kontrol uygulamaları ve pinlerden gelen değerlerin okunması ve değer gönderilmesi için de Xilinx Zynq-7010 FPGA kartını kullanmaktadır. Bu hibrit özelliği sayesinde işlem hızı ve kapasitesi artmıştır. 40 adet dijital giriş çıkış pinine sahip olan bu kart 10 adet analog girişe ve 6 adet de analog çıkışa sahiptir. Myrio-1900 FPGA kartının üzerinde iki adet MXP ve bir adet MSP portu bulunmaktadır. Bu MXP portları üzerinde 68 adet pin bulunmaktadır. Bu pinler UART, dijital ve analog giriş/çıkışlar, PWM ve topraklardan oluşmaktadırlar. Ayrıca 5 V girişi de bulunmaktadır. MSP portunda ise 10 V giriş, dijital ve analog giriş/çıkışlar bulunmaktadır. Uzaktan kontrol edilebilmek için Wi-fi butonu da bulunmaktadır. Wi-fi özelliği sayesinde uzaktan anlık olarak programlanabilmekte ve sonuçlar LabVIEW ana ekranında görüntülenebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Myrio-1900 FPGA geliştirme kartında ivme ölçer ve ses giriş/çıkışları da bulunmaktadır.

5.2. Odrive Motor Sürücü Kartı

FDAM’ların kontrolü için kullanılan motor sürücü devreleri genel olarak ESC (Electronic Speed Controller) olarak isimlendirilirler. ESC’ler birçok firma tarafından üretilebilmektedirler. Genel olarak birbirlerinin benzeri olan ancak çektiği akıma göre farklılık gösteren ürünlerdir. Bazı özel ESC’lerde bulunmaktadır. Bunları diğerlerinden ayıran avantajları motoru sadece tek yönde değil çift yönde de kontrol edebilmeleridir. Tek yönde motor kontrolü bir drone tasarımında sorun oluşturmayacaktır. Ancak bir mobil araç tasarlarken geri yön olmadığı için çok kullanışlı değildirler. Bu yüzden geri yön kontrolü bulunan ESC’ler üretilmiştir. Bu çalışmada Odrive Robotics firması tarafından üretilen Odrive V.3.6 ürünü kullanılmıştır. Bu ürün son teknoloji ile üretilen gelişmiş motor sürücü kartlarından biridir. Literatürde Odrive’ın kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

ODrive’ın sıradan ESC’lere göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları akım kontrol modu, hız kontrol modu ve konum kontrol modu bulunmasıdır. Python dili yardımıyla bilgisayar üzerinden istenilen kontrol modu aktif edilerek kapalı çevrim kontrol gerçekleştirmek mümkündür. PID parametrelerini kalibrasyon sırasında tuning yaparak belirlemektedir. Böylece kapalı çevrim kontrolünü kolaylıkla gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca motor parametrelerini tanımaktadır. Motorun kV (Volt başına hız) değerini, kutup sayısını vb. bilgileri girerek motor için en uygun kontrol değerlerini ayarlamak mümkündür. Bu özelliklere ek olarak bilgisayara bağlanarak motorun hareketleri konum ve hız grafikleri çizdirilebilmektedir. Şekil 5.8’de Odrive motor sürücü kartı verilmiştir.



Şekil 5.8. Odrive Motor Sürücü Kartı

5.3. LiDAR Mesafe Sensörü

LiDAR (Light Detection Ranging), yapısı ve kullanış şekli nedeniyle radar sözcüğünden türetilmiştir. Radar sistemlerinin çalışma prensibinde elektromanyetik dalgalardan yararlanılır ancak LiDAR manyetik herhangi bir dalga yerine lazer ışınları kullanan bir yapıya sahiptir.

LiDAR ilk ilk olarak kısa mesafeli görevlerde aktif olarak kullanılırken ilerleyen teknoloji ile birlikte kullanım alanı gittikçe yaygınlaşmıştır. LiDAR ilk olarak 1960'lı yıllarda denizaltılarının tespiti için kullanılmıştır. Daha sonra 1970'li yıllarda yaygınlaşmış ve mesafe ölçme ya da nesne yer tespitinde vazgeçilmez bir ürün haline gelmiştir.

Günümüzde ilerleyen sensör teknolojinin de etkisiyle LiDAR askeri alanda, endüstriyel alanda ve bilimsel çalışmalarda aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Üç boyutlu algılama özelliği sayesinde birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. LiDAR'ın birçok kullanım alanı olsa da günümüzde en çok otonom araçlarda kullanılmaktadır. Araç üreten birçok firma GPS'lerin yanı sıra LiDAR'ı da kullanmaktadır [39].

LiDAR araçların ön kısımlarına geniş bir açıyı algılayacak şekilde yerleştirilir. Araçlarda park durumunda ve öndeki araç ile aradaki mesafeyi hesaplamak için kullanılmaktadır. LiDAR yaklaşık olarak yüz metrelik bir alana bir saniyede bir milyon lazer titreşimi gönderebilir. Bu özelliği ile karşısına çıkan bir engeli hızlı ve net bir şekilde algılayabilir. LiDAR sadece engel algılamak için değil herhangi bir ortamı üç boyutlu haritalamak için de kullanılabilir. Lazer ışın teknolojisi kullandığı için diğer ultrasonik sensörlere göre çevre şartlarından daha az etkilenirler. Bu da LiDAR'ın kullanım alanını yaygınlaştıran özelliklerinden biridir.

LiDAR'ın avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. En önemli dezavantajlardan biri maliyetidir. Diğer dezavantajı ise üç boyutlu haritalama için kullanıldığında alınan veri yoğunluğunun çok yüksek olmasıdır. Bu yüksek veri değerini anlamlandırabilecek kadar güçlü bir bilgisayarlar gerekir.

LiDAR mesafe sensörü, kızılötesi ışınları kullanarak karşısındaki nesneye olan mesafesini hesaplar. Bu sensörler daha öncesinde kullanılan ultrasonik sensörlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. Ultrasonik sensörler mesafe ölçümü için ses dalgasını kullanırlar. Bu nedenle ortam sıcaklığında ve yapısında değişiklik olduğunda ölçüm sonuçları hatalı olur. LiDAR’da ışın teknolojisi kullanıldığı için ultrasonik sensörlere göre etkilendiği faktörler çok daha azdır.

Şekil 5.9’da gösterilen LiDAR Lite V-3’ün teknik özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir. Bu özelliklerde görüldüğü gibi kullanılan LiDAR 40 m’ye kadar net ölçümler yapabilmektedir. Üzerinde bir alıcı ve bir verici modül bulunur. Bu modüller sensörün üzerinde trig ve echo olarak isimlendirilmiştir.

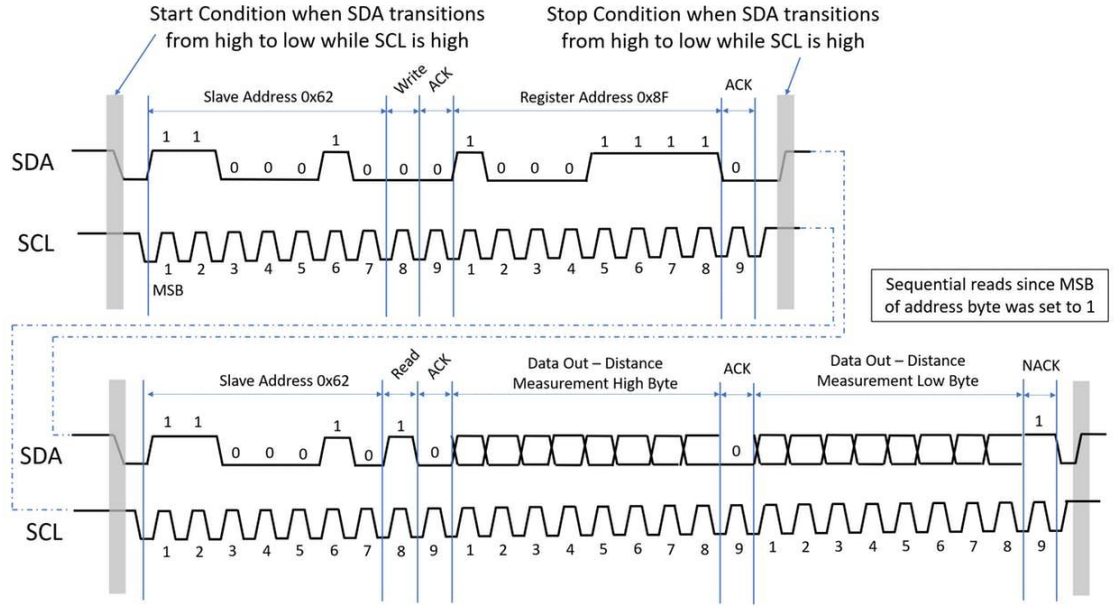


Şekil 5.9. LiDAR Lite V-3 Mesafe Sensörü

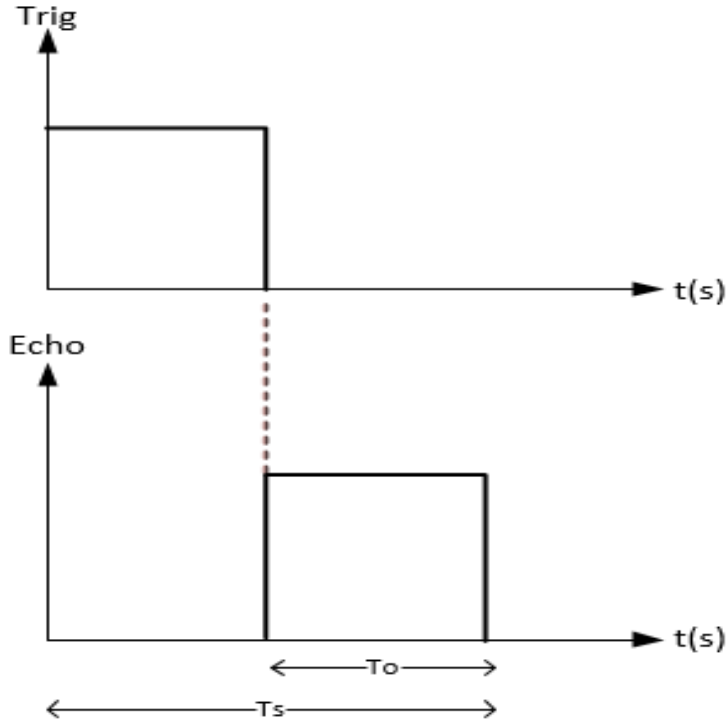
Tablo 5.3. LiDAR Lite V-3 Teknik Özellikleri

LiDAR LİTE V-3	
Güç Kaynağı	+5V DC
Boşta çektiği akım	105 mA
Çalışma akımı	135 mA
Lazer Dalga boyu	905 nm
Optik diyafram	12.5 mm
Ara yüz	I ² C veya PWM
Mesafe ölçüm aralığı	0–40m
Çözünürlük	± 1 cm
Doğruluk	5 m’den kısa mesafelerde ± 2.5 cm
Doğruluk	5 m’den büyük mesafelerde ± 10 cm
Boyut	20mm x 48mm x 40mm
Çalışma sıcaklığı	(-20)°C - 60°C

LiDAR lazer mesafe ölçüm sensörünün ölçüm yapabilmesi için trig pinine 0 değeri uygulanmalıdır. Ardından echo pininden alınan sinyaller değerlendirilerek ölçüm yapılır. LiDAR genel olarak iki çalışma protokolünü destekler. Bunlar PWM kontrolü ve I²C protokolüdür. I²C protokolü teknik farkları dışında bir kapasitör yardımıyla ölçüm alır. PWM protokolü ise kapasitör yerine bir direnç yardımıyla ölçüm alır. I²C protokolü için okuma ve yazma sinyalleri Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10. LiDAR I²C Protokol Sinyalleri [40]



Şekil 5.11. LiDAR PWM Sinyali

LiDAR sensörü ile mesafe ölçümü yapılırken genellikle PWM yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde LiDAR tarafından üretilen PWM sinyali anlamlandırılarak mesafe ölçümü yapılır. LiDAR ile mesafe ölçümü yapılırken iki adet sinyal kullanılmaktadır. Bunlar trig ve echo sinyalleridir. LiDAR’da trig sinyali 0 olarak gönderilir ve echo sinyalinin 1 olma süresi ölçülür.

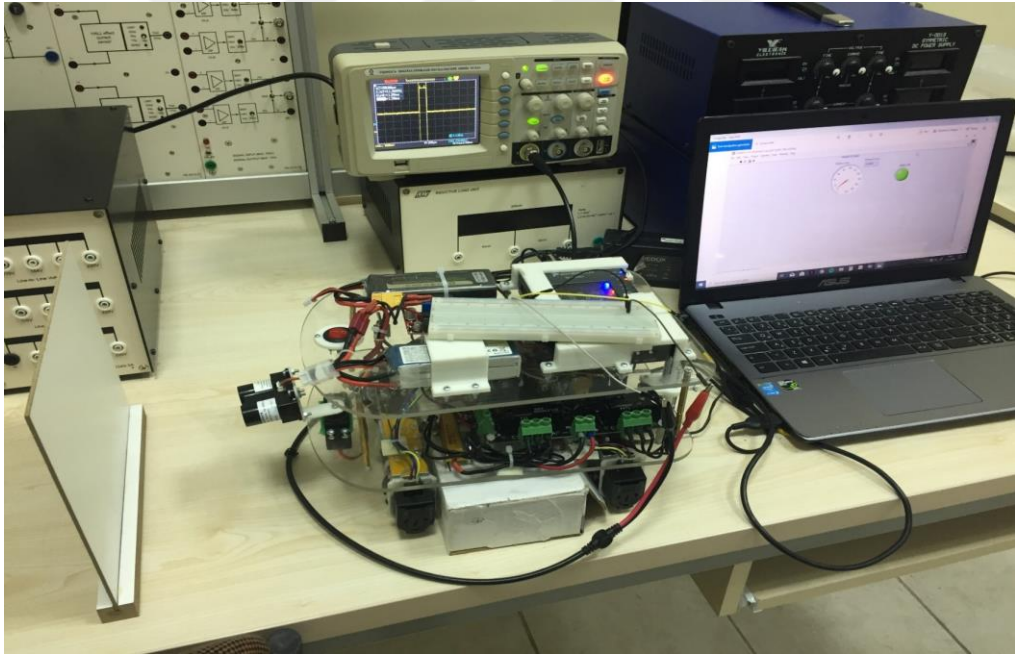
Echo sinyali bir PWM sinylidir. PWM sinyalinin 1 olduğu süre ölçölerek 10 µs/cm oranı kullanılarak mesafe ölçümü gerçekleştirilir.

Şekil 5.11’de gösterildiğı gibi bir PWM sinyalinde T₀ süresi ölçölerek Denklem 5.1’de verilen eşitlik yardımıyla santimetre cinsinden mesafe ölçümü yapılmaktadır.

$$\text{mesafe(cm)} = \frac{T_0}{10 \text{ mikrosaniye}} \quad (5.1)$$

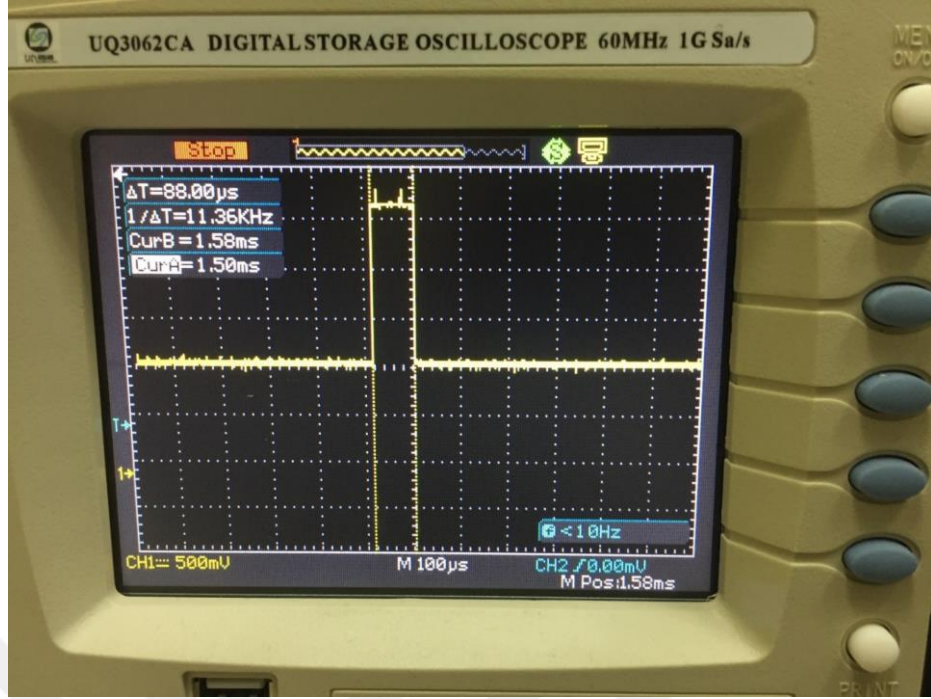
5.3.1. LiDAR Mesafe Ölçümü

Myrio-1900 FPGA kartı ile mesafe ölçümü için Şekil 5.12’de bulunan test düzeneğı kurulmuştur. Bu test düzeneğinde LiDAR tarafından üretilen PWM sinyali Myrio FPGA geliştirme kartı ile algılanarak sinyalin 1 olduğu süre ölçölmekte ve Denklem 5.1 ile mesafe değeri ölçölmemektedir. Ölçüm doğruluğunu test etmek için PWM sinyali bir Osiloskop ile gözlenmekte ve darbe genişlik süresi ölçölerek mesafe değeri hesaplanmaktadır.



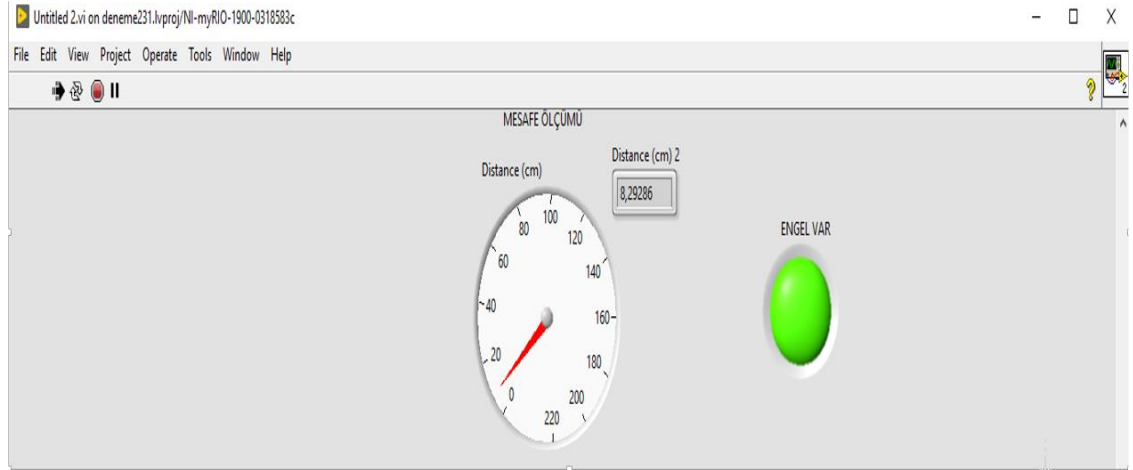
Şekil 5.12. LiDAR Mesafe Ölçümü Test Düzeneğı

Şekil 5.13’de gösterilen Osiloskop ekranı, 10 cm uzaklığa konulmuş engel mesafesinin ölçümü sonucunda elde edilen PWM sinyalini göstermektedir. ΔT olarak gösterilen değeri üretilen PWM sinyalinin 1 olma süresidir. Bu ΔT değeri Denklem 5.1’de yerine yazıldığında ölçölülen mesafe değeri 8,8 cm olduğı görölmemektedir.

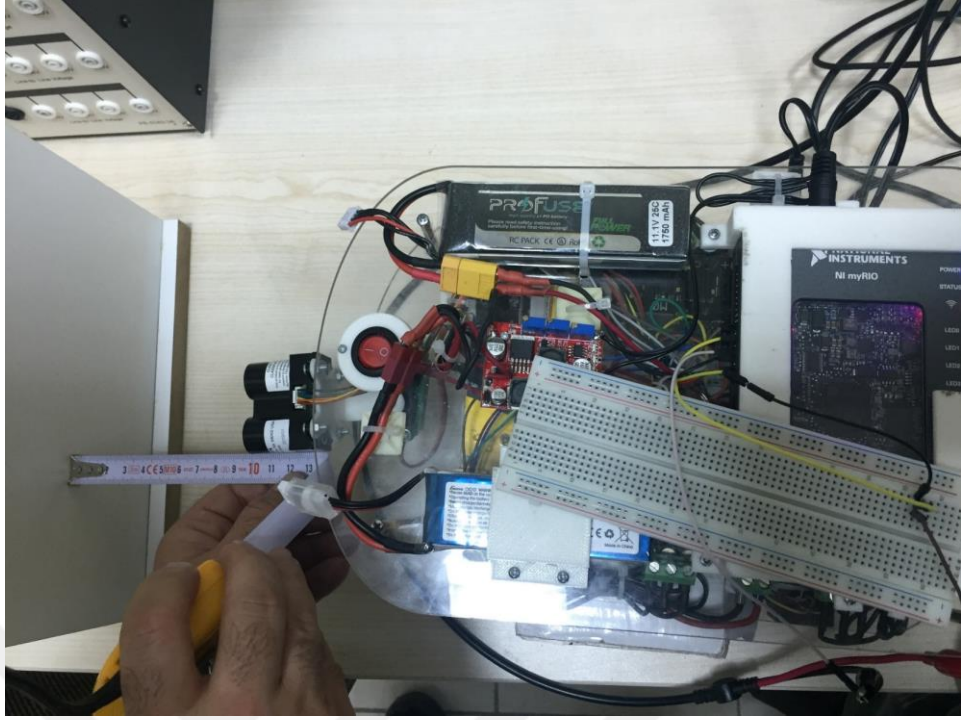


Şekil 5.13. LiDAR Mesafe Ölçümü için Osiloskop Ekranı

Şekil 5.14’de verilen Myrio-1900 FPGA geliştirme kartı ile ölçülen mesafe değeri ile Osiloskop ile elde edilen sonuç karşılaştırıldığında, aradaki farkın kabul edilebilir bir fark olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. LiDAR Mesafe Ölçümü LabVIEW Sonucu

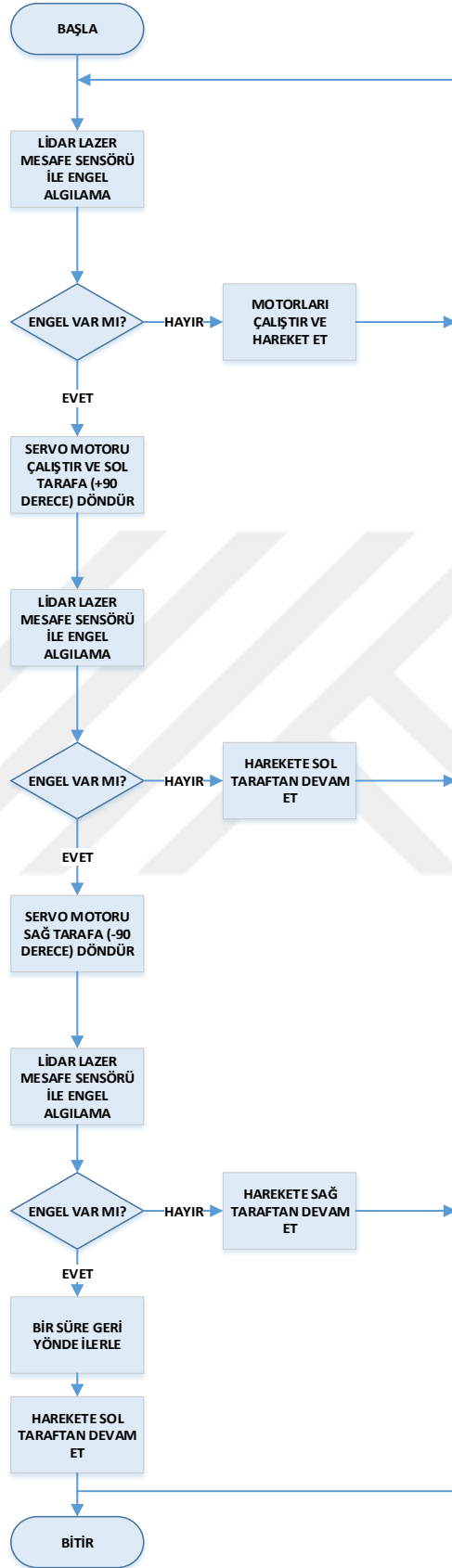


Şekil 5.15. LiDAR Mesafe Sensörü İle Engel Ölçümü

Şekil 5.15’de engel mesafesinin metre ile ölçümü verilmiştir. Bu ölçüm değeri ile MyRio-1900 FPGA geliştirme kartı ve Osiloskop ölçüm değerlerin farklı olduğu görülmektedir. Ancak bu ölçüm değerlerinin LiDAR teknik özelliklerinin verildiği Tablo 5.3’deki doğruluk değerlerine uygun olduğu görülmektedir.

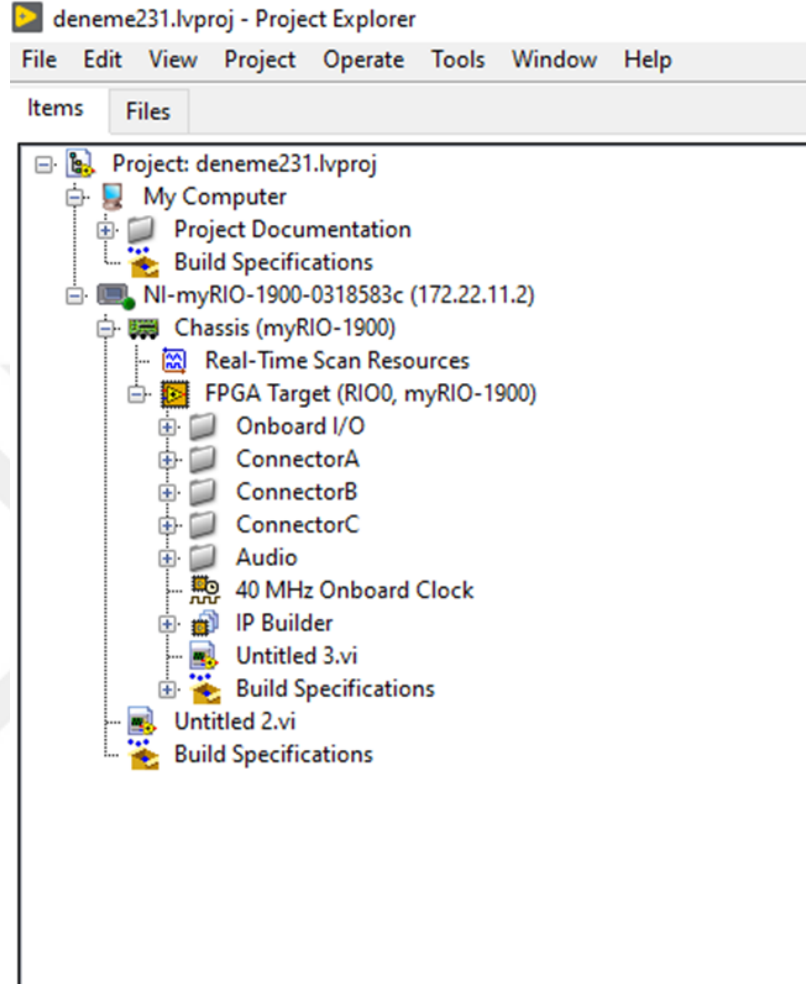
5.4. Mobil Robot Kontrol Algoritması

Mobil robotun kontrolü için FPGA’da oluşturulan algoritmanın akış diyagramı Şekil 5.16’da verilmiştir. Bu akış diyagramından da görüldüğü gibi Mobil Robot LiDAR mesafe sensöründen aldığı bilgiye göre hareket etmektedir. Mobil robot önünde engel olmadığı durumda düz ilerlemekte, engel olduğu durumda ise yönünü değiştirerek ilerlemektedir.



Şekil 5.16. Mobil Robot Kontrol Akış Diyagramı

Mobil Robotun kontrolü için oluşturulan program LabVIEW yazılımında derlenerek Myrio 1900 FPGA kartına yüklenmiştir. LabVIEW yazılımında sonuçta oluşan proje dosyası Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17. LabVIEW Proje Ekranı

Mobil Robot için LabVIEW’de yapılan görsel programlamada ilk olarak servo motor 0 derece konumuna getirilir ardından LiDAR mesafe ölçüm sensörü ile mesafe ölçümü yapılır. Ölçüm yapıldıktan sonra eğer 10 cm’den daha yakında bir engel algılanmazsa FDAM’lar aynı anda ve aynı hızla çalıştırılarak mobil robot ileriye doğru hareket ettirilir. Eğer LiDAR 10 cm’den daha yakında bir engel algılırsa motorlar durdurulur. Daha sonra mobil robotun hareket yönünü belirlemek için servo motor enerjilendirilir. LiDAR servo motorun üzerinde bağlı olduğu için servo motor hareket ettiğinde LiDAR da hareket eder. Servo motor +90 derece döndürülür ve onunla birlikte LiDAR da sol tarafa doğru döner. Böylece ilk adıma geri dönülür ve sol tarafa dönen LiDAR tekrar ölçüm yapar. Engel yoksa Mobil Robotun sola dönmesi için gereken sinyaller FDAM’lara uygulanır. Engel varsa servo motor tekrar hareket ettirilip -90 derece döndürülerek sağ

tarafa bakılır. Sağ tarafa bakıldığında yine engel varsa Mobil Robotun geriye dönmesi için gereken sinyaller FDAM'lara uygulanır. Engel yoksa Mobil Robotun sola dönmesi için gereken sinyaller FDAM'lara uygulanır. Böylece karşısına engel çıkan mobil robot sağa sola bakarak engellerden kaçır ve ilerlemeye devam eder.

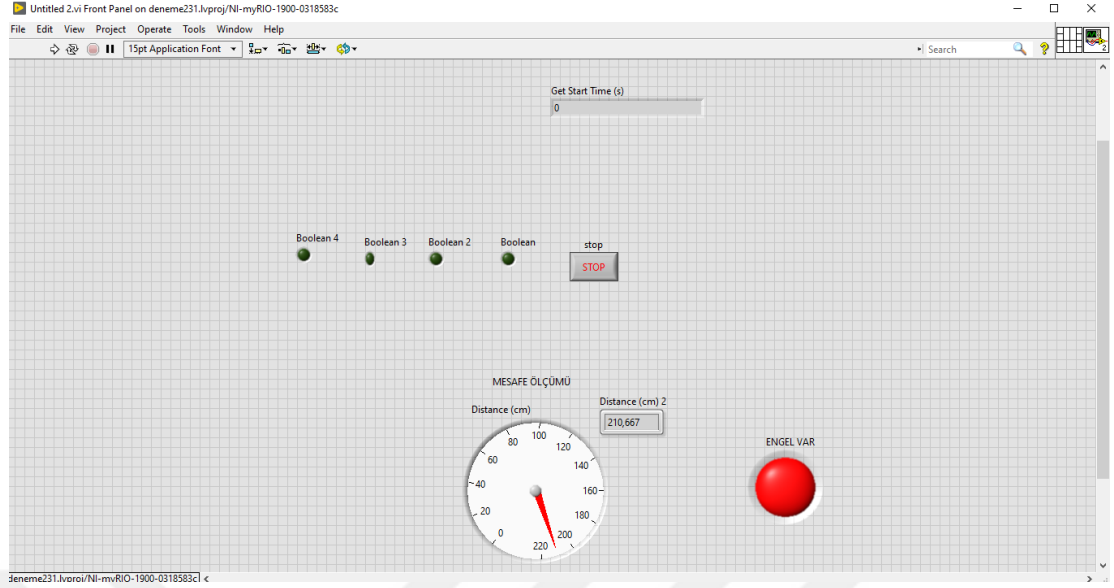
Mobil robotun sağa dönmesi için elektronik diferansiyel sistemlerinde kullanılan denklemlerden yararlanılarak sağ taraftaki iki motorun hız değeri değiştirilir sol taraftaki iki motor ise belirli bir süre boyunca aynı hızda çalıştırılır. Mobil robotun sola dönmesi için sol taraftaki iki motorun hız değeri değiştirilir, sağ taraftaki iki motor ise belirli bir süre boyunca aynı hızda çalıştırılır. Mobil robotun geriye dönmesi için tüm FDAM'ların dönüş yönü değiştirilir.

Servo motor üzerine monte edilen LiDAR'ın hareketleri Şekil 5.18'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.18. LiDAR'ın Hareketleri

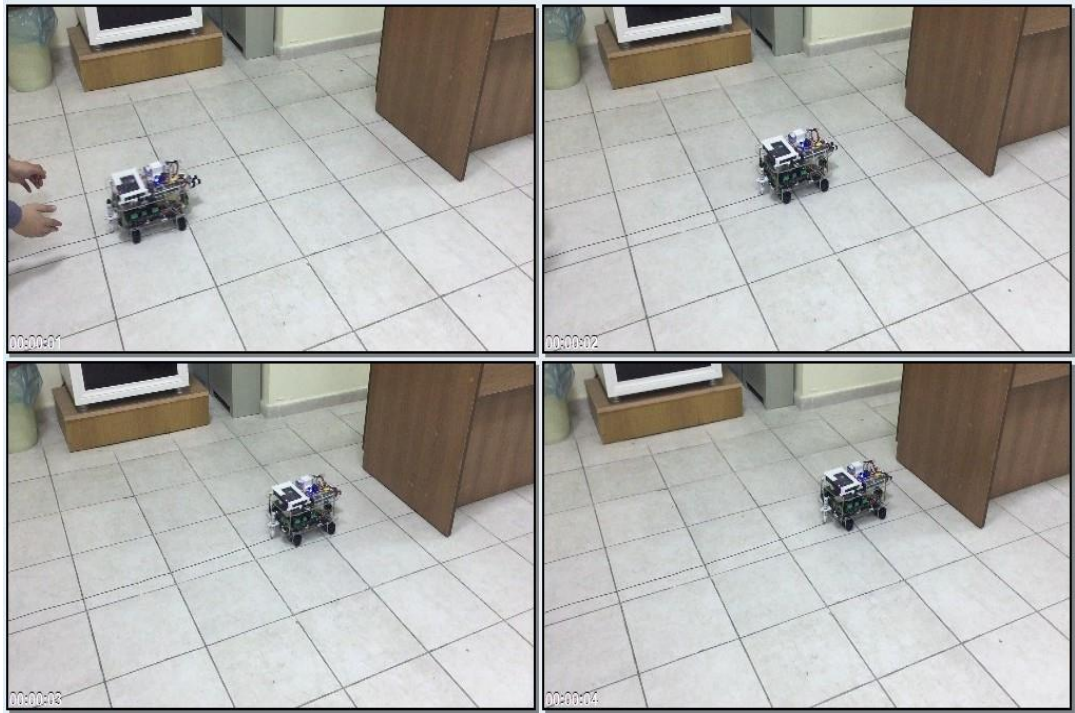
Mobil robotun aşağıdaki durumlar için yapılan kontrolü sırasında Myrio FPGA geliştirme kartına yazılan programının LabVIEW ön paneldeki ara yüzü Şekil 5.19'da görüldüğü gibidir.



Şekil 5.19. Mobil Robot Kontrolü için Oluşturulan Programın LabVIEW Ön Paneldeki Ara Yüzü

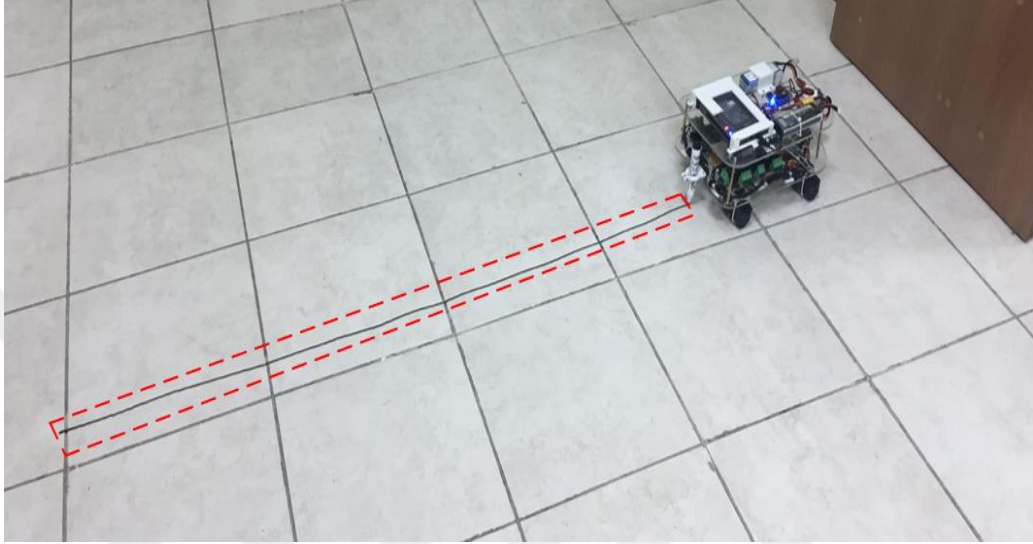
Mobil robotun oluşturulan senaryoya göre herhangi bir engelle karşılaşması durumunda gösterdiği tepkiler, mobil robotun hareketi sırasında çekilen videodan alınan resimler ile gösterilmiştir. Mobil robotun yörüngesi ise mobil robota takılan işaretleyici bir kalem ile elde edilmiştir.

Durum 1: Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması



Şekil 5.20. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması

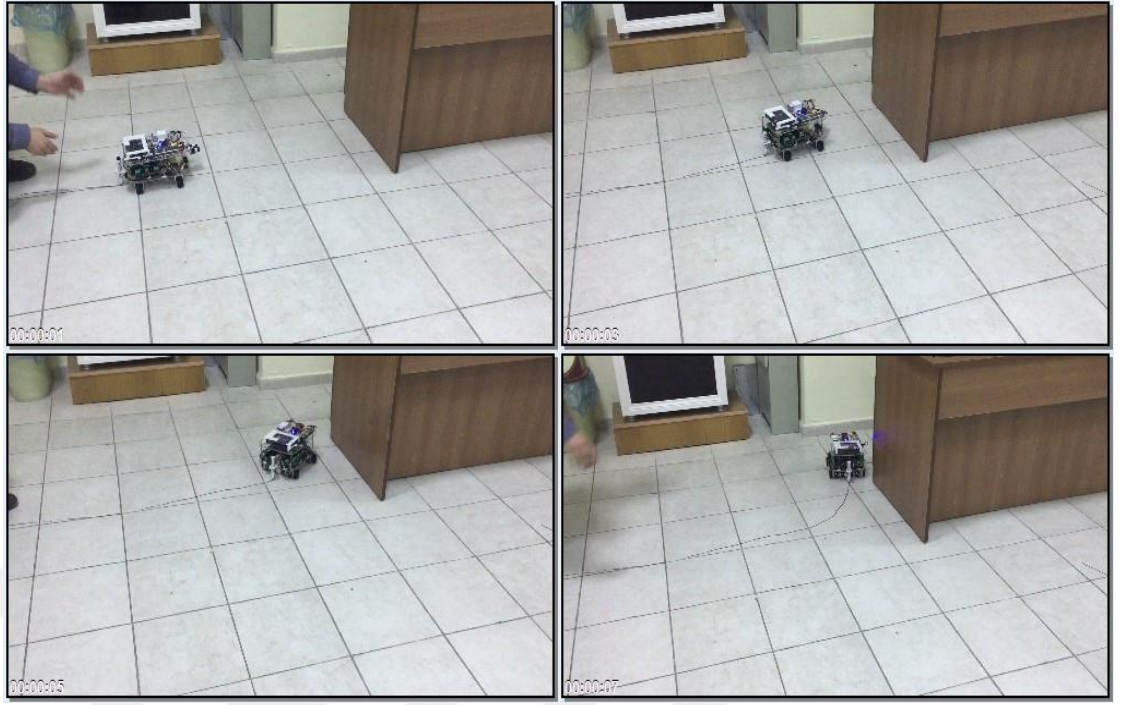
Şekil 5.20’de mobil robotun ilk hareketi, herhangi bir engelle karşılaşmadan önceki durumu, engelle karşılaştığı an ve engelle karşılaştıktan sonra verdiği tepki görülmektedir. Ayrıca mobil robotun engel kalkmadığı sürece hareket etmediği de görülmektedir. Mobil robotun ön taraftaki engel için yörüngesi Şekil 5.21’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.21. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engel için Yörüngesi

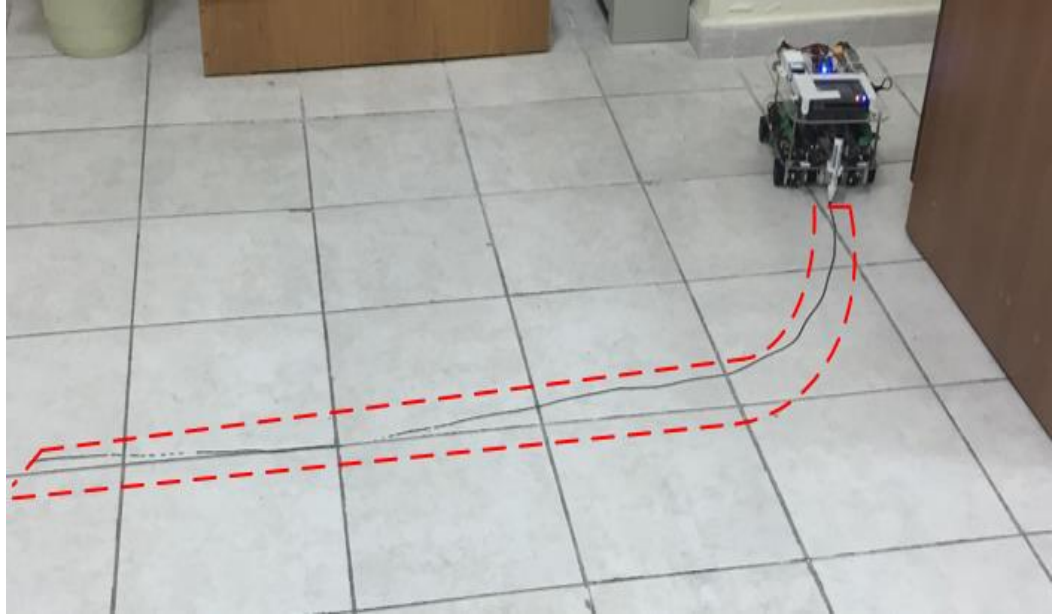
Durum 2: Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi

Mobil robotun ön taraftaki engeli algılaması ve sola doğru yön değiştirmesi Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Mobil robotun ön taraftaki engeli algılayarak sola doğru yön değiştirmesini içeren yörüngesi ise Şekil 5.23’de gösterilmiştir



Şekil 5.22. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılaması ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi

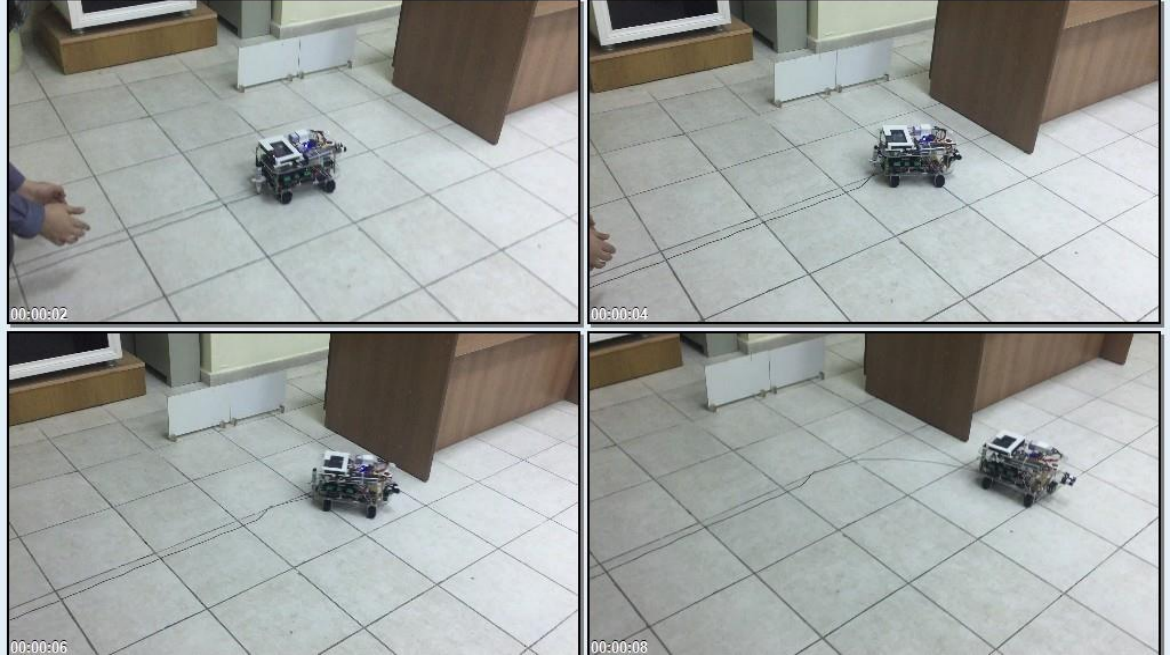
Şekil 5.22’de gösterildiği gibi mobil robot ön taraftaki engeli algıladığında durmakta ve daha sonra sol tarafa bakmaktadır. Eğer sol tarafta engel yoksa mobil robot sol tarafa dönmektedir.



Şekil 5.23. Mobil Robotun Ön Taraftaki Engeli Algılayarak Sola Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi

Durum 3: Mobil Robotun Ön Taraftaki ve Sol Taraftaki Engeli Algılaması ve Sağa Doğru Yön Değiştirme

Mobil robotun ön taraftaki ve sol taraftaki engeli algılayarak sağa doğru yön değiştirmesi Şekil 5.24’de gösterilmiştir. Mobil robotun ön taraftaki ve sol taraftaki engeli algılayarak sağa doğru yön değiştirmesini içeren yörüngesi ise Şekil 5.25’de gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Mobil Robotun Ön Taraftaki ve Sol Taraftaki Engeli Algılayarak Sağa Doğru Yön Değiştirme

Şekil 5.24’de gösterildiği gibi mobil robot ön taraftaki engeli algıladığında durmakta ve sol tarafa bakmaktadır. Sol taraftaki engeli algıladığında ise sağ tarafa bakmaktadır. Sağ tarafta engel olmadığından mobil robot sağ tarafa doğru yön değiştirmektedir.



Şekil 5.25. Mobil Robotun Ön Taraftaki ve Sol Taraftaki Engeli Algılayarak Sağa Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi

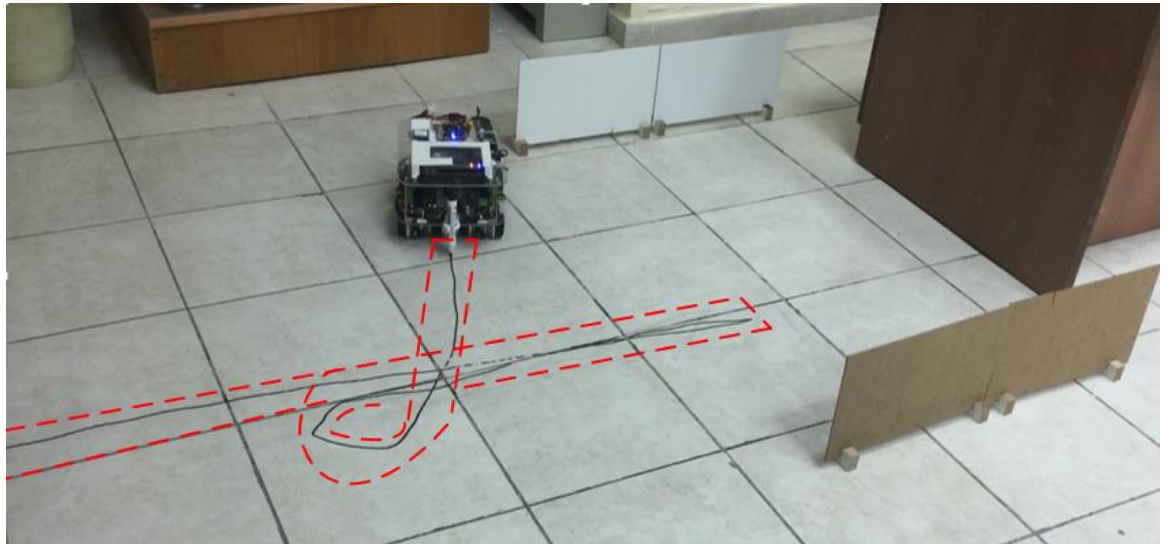
Durum 4: Mobil Robotun Ön Taraftaki, Sol Taraftaki ve Sağ Taraftaki Engeli Algılayarak Geri Yönde İlerlemesi ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi

Mobil robotun ön taraftaki, sol taraftaki ve sağ taraftaki engeli algılayarak geri yönde ilerlemesi ve sola doğru yön değiştirmesi Şekil 5.26’da gösterilmiştir. Mobil robotun ön taraftaki, sol taraftaki ve sağ taraftaki engeli algılayarak geri yönde ilerlemesi ve sola doğru yön değiştirmesini içeren yörüngesi ise Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Mobil Robotun Ön Taraftaki, Sol Taraftaki ve Sağ Taraftaki Engeli Algılayarak Geri Yönde İlerlemesi ve Sola Doğru Yön Değiştirmesi

Şekil 5.26’da gösterildiği gibi mobil robot ön taraftaki engeli algıladığında durmakta ve sol tarafa bakmaktadır. Sol taraftaki engeli algıladığına ise sağ tarafa bakmaktadır. Sağ tarafta da engel olduğundan mobil robot bir süre geri yönde gitmekte ve sola doğru dönerek yoluna devam etmektedir.



Şekil 5.27. Mobil Robotun Ön Taraftaki, Sol Taraftaki ve Sağ Taraftaki Engeli Algılayarak Geri Yönde İlerlemesi ve Sola Doğru Yön Değiştirmesini İçeren Yörüngesi

Dört farklı durum için oluşturulmuş olan senaryoya ait mobil robot hareketleri incelendiğinde, mobil robotun kontrol algoritmasına uygun olarak kararlı bir şekilde çalıştığı görülmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde mobil robotlar arama-kurtarma çalışmaları, savunma sanayii, coğrafi bilgi sistemleri, tarım uygulamaları, malzeme taşıma ve depolama uygulamaları, temizlik robotu vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mobil robotların tepki süreleri kullanılan sensörlere, eyleyicilere ve mikroişlemcilere bağlı olarak değişmektedir. Tepki süresi ne kadar hızlı ise mobil robot gerçek zamanda o kadar kullanışlı ve amacına uygun hale gelir. Son yıllarda birçok alanda yaygın bir kullanım alanına sahip FPGA, tasarım sırasında kullanıcıya sağladığı esneklik, düşük maliyet, hızlı sinyal üretme ve paralel işlem yapabilme yeteneği ile robotik sistemlerde de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, engelden kaçan dört çeker bir mobil robot tasarlanmış ve FPGA ile kontrol edilmiştir. Mobil robotta tahrik elemanı olarak FDAM kullanılmıştır. FDAM'nin sürülmesi için kapalı çevrim hız ve konum kontrolü yapabilen yeni nesil motor sürücüsü Odrive kullanılmıştır. Böylece mobil robotun daha hassas dönüş hareketlerini yapabilmesi ve geniş bir hız aralığında çalışması sağlanmıştır. Ayrıca mobil robot tekerleklerinin yüksek verimli tahrik elemanı olan FDAM ile hareket ettirilmesi ile mobil robotun enerji tüketimi de azaltılarak çalışma süresi arttırılmıştır. Engelleri algılamak için kullanılan LiDAR mesafe ölçüm sensörü bir servo motorun üzerine bağlanarak hareket ettirilmiştir. Böylece mobil robotun engelleri daha geniş bir açıda doğru bir şekilde algılaması ve hızlı bir şekilde yönünü belirlemesi sağlanmıştır. Ayrıca mobil robotta mekanik diferansiyelin yerine elektronik diferansiyel yapısı kullanılarak dört çeker aracın her bir tekerleğinin tork ve hızının ayrı ayrı kontrol edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan FPGA ile kontrol edilen FDAM tahrikli dört çeker mobil robotun engelleri hızlı bir şekilde algıladığı ve bu engele göre yönünü uygun bir şekilde değiştirdiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanarak üretilen FDAM tahrikli dört çeker mobil robotun gelecek mobil robot çalışmalarına önemli katkılar sağlaması öngörülmektedir. Tasarlanan mobil robot, yapısı bakımından geliştirilmeye açık ve farklı kontrol algoritmalarının uygulanmasına elverişlidir. Bu mobil robotta gelişmiş bir kamera sistemi eklenerek haritalama çalışmaları yapılabilir. Ayrıca mobil robot kontrol algoritması için Yapay Zekâ ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak akıllı otonom araç çalışmaları da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Akçakoca, M. (2017). *Eğitim ve Araştırma Amaçlı Gezgin Robot Geliştirilmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Han, X.; Xing, L. (2018). Mobile Robot Based on FPGA, *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City*. Xiamen, Çin.
- [3] Se, S. ;Barfoot, T; Jasiobedzki P. (2005). Visual Motion Estimation And Terrain Modeling For Planetary Rovers. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence for Robotics and Automation in Space* Ontario, Kanada.
- [4] Csaba, G.;Somlyai, L; Vamosy, Z. (2018). Mobil Robot Navigation Using 2D LIDAR. *IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*. Kosice, Slovakya.
- [5] Chiu, Z.-K.; Lee, P.-J. (2017). A Fuzzy Control For Obstacle Avoidance Implemented In The Wheel Robot With FPGA. *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)* Ho Chi Minh City, Vietnam.
- [6] Chiu, C.-S.; Chiang T-S.; Ye Y-T. (2015). Fuzzy Obstacle Avoidance Control Of A Two-Wheeled Mobile Robot. *International Automatic Control Conference (CACS)*. Yilan, Tayvan.
- [7] Sırmaçek, B. (2007). *Fpga İle Mobil Robot İçin Öğrenme Algoritması Modellenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Azarudeen, A. ; Mary, D. (2017). Performance Analysis Of Conventional And Digital PWM Control Scheme For Speed Control Of BLDC Motor Drives. *International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT)*. Coimbatore, Hindistan.
- [9] Premkumar, G.; Jayalakshmi, R.; Akramuddin Md. (2018). Design and Implementation of FPGA Based Quadcopter. *International Journal of Engineering Technology Science and Research (IJETSR)*. Rajasthan, Hindistan.
- [10] Kho, T.; Salih M.-H.; Woo Y.-S.; Min J.-J.; Yee F. (2016). Enhance implementation of embedded robot auto-navigation system using FPGA for better performance. *3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*. Phuket, Tayland.
- [11] Anitha, K.; Rao, M.S. (2018) FPGA Based Controller Design for Mobile Robots. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*,C.5, 1494-1498.
- [12] Muñoz, D.M.; Llanos, C-H.; Coelho, L.-S.; Ayala-Rincón, M. (2014). Hardware Opposition-Based PSO Applied To Mobile Robot Controllers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, C.28, 64-67.
- [13] Yadav, P.; Poola, R.; Najumudeen, K. (2016). High dynamic performance of a BLDC motor with a front end converter using an FPGA based controller for electric vehicle application. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, C.24, 1636-1651.
- [14] Kürkçü, B.; Kasnakoğlu, C.; Çetin, S. (2014). Fırçasız DC Motorun Optimal Durum-Uzayı Kontrolü. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK'14)*, Kocaeli, Türkiye.
- [15] Tashakori, A; Hassanudeen, M.; Ektesabi, M. (2015). FPGA Based Controller Drive Of BLDC Motor Using Digital PWM Technique., *11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Sydney, Avustralya.
- [16] Artuğ, T. (2010). *LabVIEW İle Mikrodenetleyicili Bir Endüstriyel Otomatik Sıcaklık Kontrol Sistemi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [17] Orman, K.; Derdiyok, A. (2017). Speed and Direction Angle Control of Four Wheel Drive Skid-Steered Mobile Robot by Fractional Order Sliding-Mode Control. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*. C.1, 38-46.
- [18] Kumar, V.; Agarwal, R.; Kumar, S. (2018) Closed Loop Speed Control Of BLDC Motor Using Microcontroller And LabVIEW Interface Monitoring. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, C.7,7447-7453.
- [19] Chen, Y.; Xie, B.; Mao, E. (2016). Electric Tractor Motor Drive Control Based On FPGA. *IFAC-PapersOnLine*, C.49, 271-276
- [20] Yıldırım, M. (2015). *Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araçlarda Elektronik Diferansiyel Sistemin Gerçekleştirilmesi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Dan, X.; Guodong, W.; Binggang, C.; Hui, G. (2011). Simulation Of Performance Of 4WD Electric Vehicle. *3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. Xian, Çin.
- [22] Yıldız, T. (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi Ve Kontrolü*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Wu, X.; Yang, L.; Xu, M. (2014). Speed Following Control For Differential Steering Of 4WID Electric Vehicle. *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Dallas, TX, ABD.
- [24] Trimberger, S. (1995). Effects of FPGA Architecture on FPGA Routing. *32nd Design Automation Conference*. San Francisco, ABD.
- [25] Leong, P.H.W. (2008). Recent Trends İn FPGA Architectures And Applications. *4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications*. Hong Kong, Çin.
- [26] Marquardt, A.; Betz, V.; Rose, J. (1999). Using Cluster-Based Logic Blocks And Timing-Driven Packing To İmprove FPGA Speed And Density. *FPGA '99 the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium*. Monterey, California, ABD.
- [27] Kaptanoğlu, S.; Bakker, G.; Kundu, A.; Corneillet, I.; Ting, B. (1999). A New High Density And Very Low Cost Reprogrammable FPGA Architecture. *FPGA '99 the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium*. Monterey, California, ABD.
- [28] Gürgöze, G.; Türkoğlu, İ. (2019). Kullanım Alanlarına Göre Robot Sistemlerinin Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C.31, 53-66.
- [29] Uzuner, M.; Yılmaz, N.; Bayrak, M. (2010). Görme Tabanlı Mobil Robot İle Farklı Renklerde Nesnelerin Gerçek Zamanlı Takibi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, C.25,759 -766.
- [30] Ezzaldeen, M.M. (2018). Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller. *Engineering and Technology Journal*, C.36, 900-905.
- [31] Chen, Z.; Tomita, M.; Doki, S.; Okuma, S. (2000). New Adaptive Sliding Observers For Position-And Velocity-Sensorless Controls Of Brushless DC Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, C.47, 582-591.
- [32] Geraee, S.; Shafiei, M.; Sahami, A. R.; Alavi, S.(2017). Position Sensorless And Adaptive Speed Design For Controlling Brushless DC Motor Drives. *North American Power Symposium (NAPS)*. Morgantown, ABD.
- [33] Hazari, M. R.; Jahan, E.; Siraj, M. E.; Khan, M. T. I.; Saleque, A. M. (2014). Design Of A Brushless DC (BLDC) Motor Controller. *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*. Dhaka, Bangladeş.

- [34] Bektaş, Y.; Serteller, N.F.O. (2010). Fırçasız Da Motorun Kontrolünde Pwm Ve Histerisiz Bant Tekniğinin Karşılaştırılması, *SDU International Journal of Technologic Sciences*, C.2, 31-45 .
- [35] Alsabbagh, A.; Szemes. P.-T.; Baki. A. (2018). Brushless DC Motor Modeling Using Bond Graph Method And Control Using LabVIEW. *Recent Innovation in Mechatronics 5.1(RIim)*, C.5,No.1, doi: 10.17667/riim.2018.1/2.
- [36] Atan, Ö. (2007). *Fırçasız Da Motorunun Modellenmesi Ve Pwm Yöntemiyle Kontrolü*. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [37] Chowdhury K.; Hossain R.; Ahmed S.; Rokon I.-R. (2015). RC Servo and Stepper Motor Control Using Verilog HDL. *SSRG International Journal of VLSI & Signal Processing (SSRG-IJVSP)*, C.2, 21-27.
- [38] Robotistan, <https://maker.robotistan.com/rc-servo-motor-nedir/>, Erişim: 29-01-2020
- [39] Suger, B.; Steder, B.; Burgard W. (2015). Traversability Analysis For Mobile Robots İn Outdoor Environments: A Semi-Supervised Learning Approach Based On 3D-Lidar Data. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, ABD.
- [40] Arduino, <https://create.arduino.cc/projecthub/ejshea/lidar-lite-module-47fdb6/>, Erişim: 29-01-2020

EKLER

EK- 1: HEDS-5540-A01 ENKODER'IN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

HEDM-55xx/560x & HEDS-55xx/56xx
Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders

AVAGO
TECHNOLOGIES

Data Sheet



Description

The HEDS-5500/5540, HEDS-5600/5640, HEDM-5500/5540 and HEDM-5600 are high performance, low cost, two and three channel optical incremental encoders. These encoders emphasize high reliability, high resolution, and easy assembly.

Each encoder contains a lensed LED source, an integrated circuit with detectors and output circuitry, and a codewheel which rotates between the emitter and detector IC. The outputs of the HEDS-5500/5600 and HEDM-5500/5600 are two square waves in quadrature. The HEDS-5540/5640 and HEDM-5540 also have a third channel index output in addition to the two channel quadrature. This index output is a 90 electrical degree, high true index pulse which is generated once for each full rotation of the codewheel.

The HEDS series utilizes metal codewheels, while the HEDM series utilizes a film codewheel allowing for resolutions to 1024 CPR.

These encoders may be quickly and easily mounted to a motor. For larger diameter motors, the HEDM-5600, and HEDS-5600/5640 feature external mounting ears.

The quadrature signals and the index pulse are accessed through five 0.025 inch square pins located on 0.1 inch centers.

Standard resolutions between 96 and 1024 counts per revolution are presently available. Consult local Avago sales representatives for other resolutions.

Features

- Two channel quadrature output with optional index pulse
- Quick and easy assembly
- No signal adjustment required
- External mounting ears available
- Low cost
- Resolutions up to 1024 counts per revolution
- Small size -40°C to 100°C operating temperature
- TTL compatible
- Single 5 V supply

Applications

The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and the HEDM-5500, 5540, 5600 provide motion detection at a low cost, making them ideal for high volume applications. Typical applications include printers, plotters, tape drives, positioning tables, and automatic handlers.

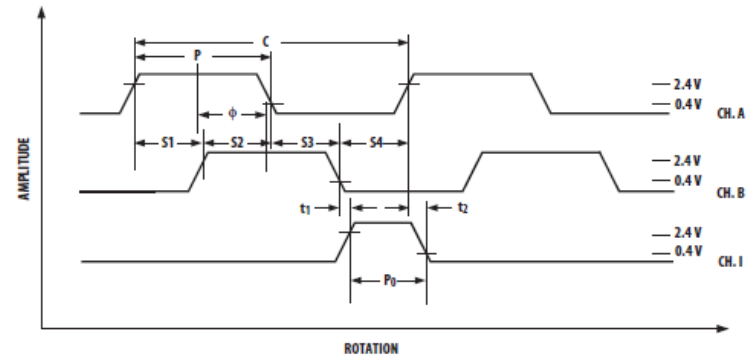
Note: Avago Technologies encoders are not recommended for use in safety critical applications. Eg. ABS braking systems, power steering, life support systems and critical care medical equipment. Please contact sales representative if more clarification is needed.

Şekil E1.1. HEDS-5540-A01 Teknik özellikleri 1

Absolute Maximum Ratings

Parameter	HEDS-55XX/56XX	HEDM-550X/560X	HEDM-5540/5640
Storage Temperature, T_S	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C	-40°C to 85°C
Operating Temperature, T_A	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C	-40°C to 85°C
Supply Voltage, V_{CC}	-0.5 V to 7 V	-0.5 V to 7 V	-0.5 V to 7 V
Output Voltage, V_O	-0.5 V to V_{CC}	-0.5 V to V_{CC}	-0.5 V to V_{CC}
Output Current per Channel, I_{OUT}	-1.0 mA to 5 mA	-1.0 mA to 5 mA	-1.0 mA to 5 mA
Vibration	20 g, 5 to 1000 Hz	20 g, 5 to 1000 Hz	20 g, 5 to 1000 Hz
Shaft Axial Play	± 0.25 mm (± 0.010 in.)	± 0.175 mm (± 0.007 in.)	± 0.175 mm (± 0.007 in.)
Shaft Eccentricity Plus Radial Play	0.1 mm (0.004 in.) TIR	0.04 mm (0.0015 in.) TIR	0.04 mm (0.0015 in.) TIR
Velocity	30,000 RPM	30,000 RPM	30,000 RPM
Acceleration	250,000 rad/sec ²	250,000 rad/sec ²	250,000 rad/sec ²

Output Waveforms



Şekil E1.2. HEDS-5540-A01 Teknik özellikleri 2

ÖZGEÇMİŞ

MEHMET BURAK GÖLEN

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : ELAZIĞ
Doğum Yılı : 1994
Uyruğu : T.C
Adres : KÜLTÜR MAH.TÜRKOĞLU SOK.HUZUR APT. NO :7/4
ELAZIĞ/MERKEZ
E-posta : burakgolen@gmail.com
Yabancı Diller : İNGİLİZCE (Düzey: B1)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “FDAM İle Hareket Ettirilen Dört Çeker Mobil Robotun FPGA ile Kontrolü...Tez Başlığı”
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Çelik
Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 2016
Lise : Elazığ Anadolu Lisesi, Elazığ, 2012

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Programlama Dilleri ve Paket Programlar : Office(Word, Excel, Powerpoint,Visio), AutoCAD, SolidWorks, SolidCam, FPGA,LabVIEW, ANSYS,C, C#, C++, Ardunio, PIC, STM Micro C.

AKADEMİK FAALİYETLER

Sempozyum

Golen M.B., Celik H ve Yigit T., Mobile Robot Control with FPGA, International Engineering and Natural Sciences Conference IENSC 2018, 14-17 Kasım, 2018, Diyarbakır-Türkiye.